



DÉMOCRATISATION DES VISIOCASQUES DE RÉALITÉ AUGMENTÉE : PERSPECTIVE DE LA SAISIE DE TEXTE DANS DES ENVIRONNEMENTS DE TRAVAIL

Thèse présentée comme exigence partielle
du doctorat en informatique cognitive

Par Damien Brun

Novembre 2020

<http://r-libre.telug.ca/2192>

RÉSUMÉ

Nombreux sont ceux qui prédisent une utilisation massive, dans un avenir proche, des visiocasques de réalité augmentée dans plusieurs domaines déjà explorés par la recherche, incluant notamment la santé, l'éducation, le divertissement et l'industrie. Chacun de ces domaines implique des scénarios avec une saisie de texte importante et ubiquitaire, qu'elle soit pour un identifiant ou un mot de passe, une annotation de documents ou d'objets virtuels, un commentaire, un rapport ou pour l'envoi de messages. Pour autant, les contextes d'utilisations et les caractéristiques des visiocasques impliquent de nouvelles interfaces dépassant le cadre habituel du couple clavier-souris ou de la surface tactile déjà adopté par l'ordinateur personnel et le téléphone intelligent. À cet égard, plusieurs interfaces de saisie de texte pour visiocasque ont été proposées, implémentées et étudiées, en passant par la reconnaissance des gestes tels que ceux des mains, de la tête ou du regard, jusqu'aux périphériques spécifiques, tels que les manettes, gants ou anneaux. Cependant aucune ne répond adéquatement aux contraintes imposées par la réalité augmentée pour les environnements de travail industriel et de bureau. En s'appuyant sur des terrains amenés par un partenaire industriel de la thèse, nos travaux tentent de répondre à cette problématique en proposant deux nouvelles interfaces complémentaires de saisie de texte dédiées aux visiocasques de réalité augmentée. La première solution, conçue pour un environnement industriel, invite les utilisateurs à combiner le port d'une montre connectée avec celui du visiocasque pour offrir une interface multimodale adaptée à des situations difficiles. La deuxième solution, conçue pour répondre aux environnements de bureau, invite les utilisateurs à manipuler un appareil cubique offrant des caractéristiques semblables aux claviers traditionnels tout en étant mobile. Nous avons adopté des méthodes itératives de conception centrée sur l'utilisateur pour implémenter des parties de nos solutions, et suivi une approche de recherche empirique comprenant huit expérimentations pour les étudier et comparer. Finalement, l'analyse des travaux nous permet d'élaborer et illustrer comment nos solutions peuvent évoluer pour atteindre d'autres contextes et activités, et ainsi participer activement à la démocratisation des visiocasques de réalité augmentée.

Mots clés : interaction humain-machine ; réalité augmentée ; saisie de texte ; visiocasque ; montre connectée ; cube.

ABSTRACT

Many people predict a massive use of augmented reality head-mounted displays in different areas already explored by research, including health, education, entertainment and industry. Each of these areas involves scenarios with significant and ubiquitous text input activity, whether for a username or password, annotation of documents or virtual objects, a comment, a report or for sending messages. However, the contexts of use and the characteristics of these augmented reality head-mounted displays imply new interfaces beyond the usual framework of the keyboard-mouse couple or the tactile surface already adopted by the personal computer and the smartphone. In that regard, several text entry interfaces for head-mounted displays have been suggested, implemented and studied, through the recognition of gestures such as those of the hands, head or gaze, up to specific peripherals, such as controllers, gloves or rings, but none adequately responds to the constraints imposed by augmented reality for industrial and office work environments. Within the limits of these contexts supported by our industrial partner, this thesis attempts to address this problem by offering two new complementary text entry interfaces dedicated to augmented reality head-mounted displays. The first solution dedicated to the industrial environment invites users to combine a smartwatch with the head-mounted display to offer a multimodal interface adapted to difficult situations. The second solution dedicated to the office environment, invites users to handle a cubic device offering similar characteristics than traditional keyboards while being mobile. We adopted iterative user-centered design methods to implement parts of our solutions, and followed an empirical research approach including eight experiments to study and compare them. Finally, the analysis of the work allows us to develop and illustrate how our solutions can evolve to reach other contexts and activities, and thus actively participate in the democratization of augmented reality head-mounted displays.

Keywords: human-computer interaction; augmented reality; head-mounted display; smartwatch; cube; text entry.

REMERCIEMENTS

Très brièvement, merci...

À mes deux papas académiques, Charles et Sébastien. Ce fut un réel plaisir d'être guidé par vous tout au long de mon doctorat. C'était parfait ! Vous m'avez soutenu par votre expertise et vous m'avez toujours fait confiance, peu importe les idées (parfois farfelues) que je souhaitais explorer.

À mes rapporteurs et membres du jury, de m'avoir fait l'honneur d'examiner mes travaux, j'apprécie, très sincèrement.

À l'ensemble des employés du partenaire industriel OHRIZON, en particulier son fondateur et directeur Lionel Guillaume, pour m'avoir accueilli.

À tous les humains (et machines) que j'ai côtoyés à l'Université TÉLUQ, Le Mans Université et l'Université du Québec À Montréal, que ce soit le personnel administratif, les collègues des laboratoires ou les professeurs du programme doctoral.

À l'ensemble des participants aux expérimentations, merci d'avoir accepté d'être cobaye, personne ne fut blessé, vous avez été brave.

À mes amis, tous ceux qui ont été sacrifiés sur l'autel de la sociabilité. À ceux (très nombreux) qui m'ont accueilli durant mes divers périples. À ma *sœurette* Marine qui m'a inspiré à poursuivre une carrière scientifique. À Perrine, mon amie spéciale de doctorat qui est loin d'être une truffe, non mais je rêve...

À ma famille qui ne me comprenait pas nécessairement, mais qui me soutenait, me soutient, et me soutiendra toujours dans mes choix professionnels, merci !

TABLE DES MATIÈRES

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
CHAPITRE I INTRODUCTION	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problématique	5
1.3 Hypothèses	8
1.4 Objectifs	10
1.5 Méthodes de recherche	11
1.6 Plan de thèse	11
CHAPITRE II ÉTAT DE L'ART DES INTERFACES DE SAISIE DE TEXTE POUR DES VISIOCASQUES	13
2.1 Critères de mesures	16
2.1.1 Vitesse de saisie de texte	16
2.1.2 Taux d'erreur (et nombre de frappes par caractère)	17
2.1.3 Charge de travail	19
2.1.4 Utilisabilité	20
2.2 Saisie de texte en utilisant le visiocasque seul	21
2.2.1 Gestes de la (ou des) main(s)	21
2.2.2 Gestes de la tête	26
2.2.3 Gestes du regard	29
2.2.4 Gestes tactiles	31
2.3 Saisie de texte avec un périphérique externe au visiocasque	34
2.3.1 Clavier traditionnel	34

2.3.2	Manette(s)	39
2.3.3	Téléphone intelligent	46
2.3.4	Gant(s)	48
2.3.5	Montre et bracelet	53
2.3.6	Anneau(x)	56
2.3.7	Clavier accord	59
2.3.8	Stylet	60
2.4	Analyse et résumé de l'état de l'art	63
CHAPITRE III CONTROLWEAR		69
3.1	Étude utilisateurs préliminaire du couple visiocasque et montre connectée	70
3.1.1	Interfaces	71
3.1.2	Participants	71
3.1.3	Matériel	72
3.1.4	Logiciels	72
3.1.5	Tâche	73
3.1.6	Procédure	74
3.1.7	Résultats	75
3.1.8	Discussion	77
3.2	État de l'art spécifique : interface de saisie de texte pour montre connectée	78
3.2.1	Écran tactile	78
3.2.2	Autres composants	90
3.2.3	Analyse et résumé	98
3.3	Critères et considérations de conception de l'interface ControlWear	100
3.4	Implémentation	102
3.4.1	Interfaces et architecture	102
3.4.2	Reconnaissance automatique des caractères	107
3.5	Étude utilisateurs 1 : <i>in situ</i>	109

3.5.1	Participants	109
3.5.2	Matériel	110
3.5.3	Logiciel	110
3.5.4	Tâche	114
3.5.5	Procédure	114
3.5.6	Résultats	116
3.5.7	Discussion	124
3.6	Collection de modèles de type Graffiti	125
3.6.1	Modèles	126
3.6.2	Collecte des nouveaux modèles pour la reconnaissance des caractères	127
3.6.3	Discussion	130
3.7	Étude utilisateurs 2 : contrôlée	131
3.7.1	Situations	131
3.7.2	Participants	132
3.7.3	Appareils	133
3.7.4	Logiciel	133
3.7.5	Tâche	135
3.7.6	Procédure	135
3.7.7	Résultats	136
3.7.8	Discussion	142
3.8	Conclusion, limites et perspectives	143
	CHAPITRE IV KEYCUBE	147
4.1	État de l'art spécifique : dispositifs interactifs de forme cubique	149
4.1.1	Exploration et navigation	149
4.1.2	Manipulation tridimensionnelle	155
4.1.3	Apprentissage	159

4.1.4	Analyse et résumé	162
4.2	Conception et implémentation de l'interface Keycube	165
4.2.1	Matériel	166
4.2.2	Logiciel	170
4.3	Étude utilisateurs 1 : saisie de l'appareil	171
4.3.1	Participants	172
4.3.2	Matériels et logiciels	172
4.3.3	Procédure	173
4.3.4	Résultats	174
4.4	Étude utilisateurs 2 : accessibilité et préférence	179
4.4.1	Participants	179
4.4.2	Matériels et logiciels	179
4.4.3	Procédure	180
4.4.4	Résultats	181
4.5	Conception de la disposition cubique	185
4.6	Étude utilisateurs 3 : transfert et apprentissage	188
4.6.1	Participants	189
4.6.2	Matériel	189
4.6.3	Logiciel	191
4.6.4	Procédure	192
4.6.5	Résultats	195
4.6.6	Discussion	201
4.7	Étude utilisateurs 4 : réalité augmentée et usage des doigts	204
4.7.1	Participants	205
4.7.2	Matériels	206
4.7.3	Logiciel	206
4.7.4	Procédure	208

4.7.5	Résultats	210
4.7.6	Discussion	217
4.8	Étude de cas : longitudinale	221
4.8.1	Participant	221
4.8.2	Matériel	222
4.8.3	Logiciel	223
4.8.4	Procédure	223
4.8.5	Résultats	224
4.8.6	Discussion	226
4.9	Conclusion, limites et perspectives	228
	CHAPITRE V CONCLUSION	232
5.1	Contributions	232
5.1.1	Méta-analyse	233
5.1.2	Artéfact	233
5.1.3	Empirique	234
5.2	Perspectives	237
	APPENDICE A PROJET CARTON	239
A.1	Requis	240
A.1.1	Outils	240
A.1.2	Matériaux	240
A.2	Plan	241
	APPENDICE B KEYCUBE	244
B.1	Circuit électronique	245
B.2	Vue en éclaté	246
B.3	Accessibilité des touches par doigt	247
B.4	Phrases utilisées pour l'analyse de l'usage des doigts	248
	APPENDICE C QUESTIONNAIRES STANDARDISÉS	249

C.1	System Usability Scale	250
C.2	NASA Task Load indeX (TLX)	251
C.3	AttrakDiff (version allégée)	252
	APPENDICE D QUESTIONNAIRES PERSONNALISÉS	253
D.1	Étude utilisateurs préliminaire ControlWear	254
D.2	Étude utilisateurs ControlWear : <i>in situ</i>	255
D.3	Étude utilisateurs ControlWear : contrôlée	256
D.4	Étude utilisateurs keycube 1 : saisie de l'appareil	257
D.5	Étude utilisateurs keycube 2 : accessibilité et préférence	258
D.6	Étude utilisateurs keycube 3 : transfert et apprentissage	259
D.7	Étude utilisateurs keycube 4 : réalité augmentée et usage des doigts	260
	RÉFÉRENCES	261

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Liste des publications scientifiques des travaux de cette thèse présentés par ordre antéchronologique :

- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Keycube: Text Entry Evaluation with a Cubic Device, *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-9. 2020
- **Damien Brun**, Stéphane Safin, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Mixed Reality at Work: Health, Social and Ethical Implication, *Proceedings of the Workshop on Exploring Potentially Abusive Ethical, Social and Political Implications of Mixed Reality Research in HCI (Workshop Videoconference, CHI)*. 2020
- Perrine Ruer, **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Évelyne F. Vallières. Designing a Navigation System for Older Adults: A Case Study Under Real Road Condition, *International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, 168-179. 2019
- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Cubic controller device, *brevet en instance 19315022.4*, 2019
- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Keycube is a Kind of Keyboard (k3), *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, INT034 :1–INT034 :4. 2019
- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Toward Discreet Interactions and Publicly Explicit Activities, *Proceedings of the 1st Workshop on Challenges Using Head-Mounted Displays in Shared and Social Spaces (at CHI)*. 2019

- **Damien Brun**. Multimodal and Context-Aware Interaction in Augmented Reality for Active Assistance, *Proceedings of the 2018 on International Conference on Multimodal Interaction (ICMI)*, 506-510. 2018
- **Damien Brun**, Perrine Ruer, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. A Toolkit for Exploring Augmented Reality Through Construction with Children, *Proceeding of the 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 106-113. 2018
- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Construction Par et Pour l'Exploration de la Réalité Augmentée Chez les Enfants, *Colloque en Informatique Cognitive, Université du Québec à Montréal*, 2018
- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Augmented Human Mind: Case of Reasoning, *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp)*, 717-723. 2017
- **Damien Brun**, Susan M. Ferreira, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. A mobile platform for controlling and interacting with a do-it-yourself smart eyewear, *International Journal of Pervasive Computing and Communications (IJPCC)*, 41-61. 2017
- **Damien Brun**, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. Une plateforme mobile pour contrôler et interagir avec des lunettes intelligentes «fait maison», *Colloque en Informatique Cognitive, Université du Québec à Montréal*, 2017
- **Damien Brun**, Susan M. Ferreira, Charles Gouin-Vallerand, Sébastien George. CARTON Project: Do-It-Yourself Approach to Turn a Smartphone into a Smart Eyewear, *Proceedings of the 14th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multi Media (MoMM)*, 128-136. 2016

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Structure de la thèse	12
2.1 Résumé de la sous-catégorie Gestes de la (ou des) main(s).	26
2.2 Résumé de la sous-catégorie Gestes de la tête.	28
2.3 Résumé de la sous-catégorie Gestes du regard.	31
2.4 Résumé de la sous-catégorie Gestes tactiles.	34
2.5 Résumé de la sous-catégorie Clavier traditionnel.	39
2.6 Résumé de la sous-catégorie Manette(s).	45
2.7 Résumé de la sous-catégorie Téléphone intelligent.	48
2.8 Résumé de la sous-catégorie Gant(s).	53
2.9 Résumé de la sous-catégorie Montre et bracelet.	56
2.10 Résumé de la sous-catégorie Anneau(x).	59
2.11 Résumé de la sous-catégorie Clavier accord.	60
2.12 Résumé de la sous-catégorie Stylet.	62
2.13 Écart des vitesses de saisie de texte et résumé des caractéristiques positives et négatives par sous-catégorie.	64
3.1 Résumé de la sous-catégorie Appui discret.	84
3.2 Résumé de la sous-catégorie Appui continu.	90
3.3 Résumé de la sous-catégorie Capteurs tangibles.	93
3.4 Résumé de la sous-catégorie Capteurs non tangibles.	98

3.5	Écart des vitesses de saisie de texte et caractéristiques des sous-catégories de l'état de l'art spécifique à la saisie de texte sur montre connectée.	98
3.6	Résumé des résultats de l'étude utilisateurs <i>in situ</i>	124
3.7	Ensemble de phrases utilisé pour la tâche de retranscription basé sur le corpus Enron (Vertanen et Kristensson, 2011).	135
3.8	Exemple de mise à jour du taux d'erreur pour les phrases validées trop tôt.	138
B.1	Phrase d'entraînement et phrases utilisés pour l'analyse de l'usage des doigts.	248

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Exemples d'utilisation d'un visiocasque de réalité augmentée dans des environnements de type industriel et de bureau.	4
1.2 Résumé de notre évolution et précision de la motivation.	5
1.3 Dimensions contraignantes pour les interfaces de saisie de texte de visiocasques de réalité augmentée dans les environnements de type industriel et de bureau.	6
1.4 Résumé de notre approche, de la problématique aux méthodes. . .	11
2.1 Exemples de visiocasques pouvant offrir des expériences de réalité augmentée de qualité variable.	13
2.2 Représentation simplifiée du continuum réalité-virtualité.	14
2.3 <i>ARKB</i> . Marqueur de couleur sur le bout des doigts, marqueur fiduciale et clavier virtuel.	22
2.4 <i>Air Typing</i> . Dispositions monomanuel et bimanuel du clavier virtuel.	22
2.5 Utilisation d'un dispositif complémentaire de reconnaissance des mouvements.	23
2.6 <i>FistPointer</i> . Position du pouce pour sélectionner puis « cliquer » (métaphore de l'appui sur un bouton).	24
2.7 <i>VISAR</i> . Utilisateur saisissant du texte et vue du clavier VISAR à travers le visiocasque (Microsoft HoloLens).	24
2.8 <i>PalmFlick</i> et <i>MidAirFlick</i> . Détection des appuis sur la paume de la main ou en l'air.	25
2.9 Geste de la main avec la technique de saisie gestuelle.	26
2.10 Geste de la tête comme pointeur (gauche) et implémentation de l'interface Dasher sur visiocasque (droite).	27

2.11	Clavier virtuel de l'interface <i>GestureType</i> (similaire pour <i>TapType</i> et <i>DwellType</i>).	28
2.12	Gestuelle du regard avec clavier virtuel plat-condensé et courbé-étiré.	29
2.13	Interface multimodale entre le suivi oculaire et le geste tactile.	30
2.14	<i>SwipeZone</i> . Interface de saisie de texte en deux temps sur surface tactile.	31
2.15	<i>1D Handwriting</i> . Écriture manuscrite mono directionnelle sur surface tactile.	32
2.16	<i>FaceTouch</i> . Interface tactile complémentaire placée directement sur le visiocasque.	33
2.17	<i>CheekInput</i> . Interface tactile basée sur les déformations des joues.	33
2.18	Le clavier traditionnel en réalité virtuelle, étude des effets du retour visuel des mains.	35
2.19	Virtualité augmentée pour intégrer le clavier traditionnel.	35
2.20	Sensibilité des touches du clavier traditionnel.	36
2.21	Configuration simple et mobile en utilisant un clavier traditionnel sans fil avec un visiocasque à base de téléphone intelligent.	37
2.22	Clavier porté sur l'avant-bras.	37
2.23	<i>Torso Keyboard</i> . Clavier porté sur le torse.	38
2.24	<i>HawKey</i> . Support mobile pour clavier traditionnel.	38
2.25	<i>PizzaText</i> . Clavier virtuel circulaire pour manette traditionnelle.	40
2.26	Clavier virtuel <i>Contact</i> , <i>Marionette</i> , <i>Pointeur</i> et <i>Projection</i> utilisable avec une ou des manettes.	41
2.27	<i>Vitty</i> . Ajout de boutons physiques sur des manettes de type bâton.	42
2.28	Technique du pointeur pour l'écriture manuscrite (avec une manette).	43
2.29	Clavier cubique virtuel utilisable avec des manettes.	43
2.30	Technique de <i>Pointeur</i> par manette avec la saisie de mots par gestuelle.	44

2.31	Clavier virtuel basé sur la métaphore de la <i>batterie</i>	44
2.32	<i>HiPad</i> , clavier virtuel circulaire avec une seule manette.	45
2.33	<i>HoVR-Type</i> . Utilisation de la reconnaissance des doigts flottants sur téléphones intelligents.	46
2.34	<i>BlindType</i> . Optimisation de la disposition du clavier virtuel sur téléphone intelligent pour une utilisation avec visiocasque.	47
2.35	Utilisation de la sensibilité à la force d'appui sur l'écran tactile d'un téléphone intelligent avec la technique de saisie de mots par gestuelle.	47
2.36	<i>Pinch Keyboard</i> . Paire de gants avec points de contact placés au bout des doigts.	49
2.37	<i>KITTY</i> . Paire de gants avec points de contact placés le long des doigts.	49
2.38	Gant dédié aux gestuelles discrètes.	50
2.39	Paire de gants avec retour haptique réaliste.	50
2.40	<i>DigiTouch</i> . Paire de gants avec des zones tactiles.	51
2.41	Gant sensible à la force d'appui.	51
2.42	<i>HiFinger</i> . Gant avec points de contact sur deux doigts.	52
2.43	<i>PinchType</i> . Groupements de caractères par doigt basés sur la disposition QWERTY avec suggestion de mots.	53
2.44	<i>DigiTap</i> . Caméra et centrale inertielle placées sur un bracelet.	54
2.45	<i>PalmType</i> . Clavier disposé sur la paume de main.	55
2.46	<i>HoldBoard</i> . Montre connectée avec surface tactile périphérique.	55
2.47	<i>TEXTile</i> . Surface tactile (textile) placée sur l'avant-bras.	56
2.48	<i>FingeRing</i> . Ensemble de cinq anneaux équipés d'accéléromètre.	57
2.49	<i>ThumbText</i> . Anneau équipé d'une surface tactile.	58
2.50	<i>RotoSwype</i> . Anneau équipé d'une centrale inertielle et d'un bouton pour saisir des mots par gestuelle.	58

2.51	<i>TipText</i> . Peau interactive sensible au toucher placée sur l'index. . .	59
2.52	Deux claviers accords : <i>Kordic Keypad</i> (gauche) et <i>Twiddler</i> (droite). 60	
2.53	<i>Virtual Notepad</i> . Stylet et tablette pour la prise de note manuscrite. 61	
2.54	Utilisation du stylet et d'une tablette avec un clavier virtuel. . . .	61
2.55	Trois interfaces utilisant le stylet et une tablette : clavier virtuel standard, clavier virtuel circulaire et reconnaissance manuscrite. .	62
3.1	Organisation du chapitre sur l'interface ControlWear.	70
3.2	Schématique d'utilisation des interfaces <i>Tête</i> , <i>Tactile</i> et <i>Montre</i> . .	72
3.3	Interfaces visuelles (couleurs inversées) de l'application mobile pour le visiocasque CARTON.	73
3.4	Résultats du taux de succès, de la vitesse du jeu de rapidité, de la préférence et du choix pour chacune des interfaces.	75
3.5	<i>ZoomBoard</i> . Agrandissement de la disposition du clavier virtuel. .	79
3.6	Clavier virtuel alphabétique avec suggestion des mots.	80
3.7	<i>Callout</i> et <i>ZShift</i> . Agrandissement visuel de la zone d'appui. . . .	80
3.8	<i>UniWatch</i> . Affectation d'un symbole (trait diagonal, vertical et courbé) pour chaque caractère.	81
3.9	<i>DualKey</i> . Boutons virtuels réagissant différemment suivant le doigt utilisé.	81
3.10	<i>ETAO</i> . Disposition des lettres suivant leur fréquence dans la langue anglaise.	82
3.11	<i>ForceBoard</i> . Clavier virtuel sensible à la force d'appui.	82
3.12	Interface de saisie de texte pour montre connectée associant transparence et inclinaison.	83
3.13	<i>DiaQwerty</i> . Disposition des boutons virtuels en forme de diamant. 83	
3.14	<i>VelociWatch</i> . Intégration dynamique des suggestions de mots. . . .	84
3.15	<i>SwipeBoard</i> . Clavier virtuel basé sur la combinaison de plusieurs glissements unidirectionnels.	86

3.16	<i>DragKeys</i> . Clavier virtuel basé sur le glissement multidirectionnel.	86
3.17	<i>Virtual Sliding QWERTY (VSK)</i> . Naviguer à travers le clavier virtuel.	87
3.18	<i>SplitBoard</i> . Séparation du clavier virtuel.	87
3.19	<i>DriftBoard</i> . Déplacer le clavier virtuel sous un curseur fixe pour saisir des caractères.	88
3.20	<i>SwipeKey</i> . Glissements unidirectionnels depuis des boutons virtuels.	88
3.21	<i>Invisiboard</i> . Disposition de clavier virtuel invisible.	89
3.22	Interface de saisie de texte pour montre connectée basée sur l'écriture manuscrite simplifiée.	89
3.23	<i>Button Keyboard</i> . Boîtier de 9 boutons portable.	91
3.24	Interfaces de saisie de texte pour montre connectée basées sur un bracelet tactile.	91
3.25	<i>COMPASS</i> . Utilisation (rotation) d'un anneau circulaire tangible.	92
3.26	<i>FingerT9</i> . Ensemble de capteurs portés entre les articulations des doigts.	93
3.27	<i>InclineType</i> . Clavier rectangulaire basé sur l'inclinaison du poignet.	94
3.28	Interface de saisie de texte utilisant la reconnaissance vocale avec un alphabet phonétique simplifié.	94
3.29	<i>WatchMI</i> . Écran tactile traditionnel sensible à la force d'appui par l'intermédiaire de la centrale inertielle de la montre connectée. . .	95
3.30	Interface de saisie de texte pour montre connectée basée sur des détecteurs à effet Hall.	96
3.31	<i>Vouch-T</i> . Utilisation multimodale de la voix et du toucher.	96
3.32	<i>WrisText</i> . Clavier circulaire basé sur l'inclinaison du poignet. . . .	97
3.33	<i>SHOW (Smart Handwriting On Watches)</i> . Écriture manuscrite sur n'importe quelle surface horizontale.	97
3.34	Interfaces et communications entre les différents appareils de l'implémentation de ControlWear.	104

3.35	Architecture logicielle, comportement et communication de ControlWear.	104
3.36	Modèle des lettres de l'alphabet.	108
3.37	Visiocasque de réalité augmentée Microsoft HoloLens, montre connectée Fossil Sport, tablette Galaxy Tab 2 et téléphone intelligent Google Pixel.	110
3.38	Mise à jour de l'interface visuelle (de la version sur tablette) pour qu'elle soit adaptée au visiocasque de réalité augmentée (gauche anciennes, droite nouvelles).	111
3.39	Outil SoTech pour les techniciens portant le visiocasque de réalité augmentée (gauche) et l'application mobile pour contrôler l'étude utilisateurs (droite).	112
3.40	Interface ControlWear intégrée à l'application SoTech sur visiocasque de réalité augmentée.	113
3.41	Utilisation de la tablette, du visiocasque de réalité augmentée et de la montre connectée pour l'inspection de traversées.	115
3.42	Vitesse moyenne de saisie de texte en mots par minute pour chaque interface (gauche) et nombre de frappes moyen par caractère pour chaque interface (droite).	117
3.43	Temps moyen en secondes pour effectuer une tâche d'inspection (avec et hors saisie de textes) pour chacune des interfaces.	118
3.44	Moyenne des scores bruts du NASA-TLX et de ses dimensions par interface.	119
3.45	Moyenne des scores du SUS par interface avec les marges d'acceptabilité et adjectifs qualificatifs.	120
3.46	Moyenne des scores par dimension de l'AttrakDiff pour chaque interface.	121
3.47	Moyenne des scores par paire de mots de l'AttrakDiff pour chaque interface.	122
3.48	Moyennes des scores de classement variant entre 0 (dernier) et 3 (premier) de préférence des interfaces.	123

3.49	Caractères basés sur Graffiti mis à jour : F, K, Q, T, X et Y. . . .	127
3.50	Ensemble complet des caractères basés sur Graffiti (de haut en bas et de gauche à droite : l'alphabet, les chiffres, l'espace, le retour arrière, le retour à la ligne, et un caractère de combinaison). . . .	127
3.51	Interface du logiciel de collection des modèles (gauche) et nouveau disque de l'interface de ControlWear pour le visiocasque de réalité augmentée (droite).	128
3.52	Illustration des situations : <i>Debout</i> , <i>Mains occupées</i> , <i>Espace restreint</i> et <i>Couché</i>	132
3.53	Visiocasque de réalité augmentée Microsoft HoloLens, montre connectée Fossil Sport et téléphone intelligent Google Pixel.	134
3.54	Visuel de l'interface de l'application mobile accompagnant l'instructeur (gauche) et de l'application sur visiocasque.	134
3.55	Une participante dans les situations : <i>Couché</i> , <i>Mains occupées</i> et <i>Espace restreint</i>	136
3.56	Moyennes des vitesses de saisie de texte (en mots par minute) par situation, par interface et par interface pour chaque situation. . .	138
3.57	Taux d'erreur (en pourcentage) par situation, par interface et par interface pour chaque situation.	139
3.58	Nombre de frappes par caractère (NFPC) par situation, par interface et par interface pour chaque situation.	139
3.59	Préférence des interfaces (totale et par situation).	141
3.60	Usage détaillé de l'interface <i>Mixte</i>	141
3.61	Évolution de la vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère rapportée par session.	143
4.1	Illustration de l'utilisation du keycube dans un environnement de bureau.	148
4.2	Organisation du chapitre sur l'interface Keycube.	148
4.3	<i>Navigational Blocks</i> . Ensemble de cubes dédié à l'exploration d'une galerie virtuelle.	150

4.4	Interfaces tangibles pour un système multimédia.	150
4.5	<i>Magic Story Cube</i> . Cube (dé)pliable dédié à la narration d'histoires.	151
4.6	<i>MusicCube</i> . Cube dédié au contrôle musical.	151
4.7	À gauche : <i>Z-agon</i> , proposition d'un cube couvert d'écrans. À droite : cube dédié à la narration d'histoires en réalité augmentée.	152
4.8	<i>CubeBrowser</i> . Cube dédié à la navigation de bases de données. . .	152
4.9	<i>Tangible Spin Cube</i> . Paire de cubes rotatifs.	153
4.10	<i>MediCubes</i> . Ensemble de cubes dédié aux contrôles médicaux. . .	154
4.11	<i>Loaded Dice</i> . Paire de cubes dédiée aux activités de co-conception.	154
4.12	<i>CubeLendar</i> . Cube informant (date, heure, prévision météorolo- gique) et notifiant (événements).	155
4.13	<i>3-D Shape Deformation</i> . Cube physiquement déformable.	155
4.14	<i>Cubic Mouse</i> . Cube traversé par 3 barres et dédié aux environne- ments tridimensionnels.	156
4.15	<i>CUBIK</i> . Cube extensible dédié à la conception assistée par ordinateur.	157
4.16	<i>ActiveCube</i> . Ensemble de cubes connectés à assembler.	157
4.17	<i>CubTile</i> . Cube fixe composé de surfaces tactiles multicontacts. . .	158
4.18	<i>pCubee</i> . Conteneur cubique d'entités virtuelles.	158
4.19	<i>CAPTIVE</i> . Conteneur cubique d'entités virtuelles par réalité aug- mentée.	159
4.20	<i>Rubikon</i> . Cube basé sur le mécanisme du Cube de Rubik.	159
4.21	<i>Learning Cube</i> . Cube dédié à la construction de représentations mentales tridimensionnelles.	160
4.22	<i>i-Cube</i> . Ensemble de cubes connectés intégrant des scénarios d'ap- prentissage.	161
4.23	<i>Sifteo Cubes</i> . Ensemble de cubes connectés et programmables. . .	161

4.24	<i>Cube-in</i> . Ensemble de cubes dédié à l'apprentissage de l'informatique et électronique.	162
4.25	<i>CUPA</i> . Cube dédié au développement de l'intelligence émotionnelle des enfants.	162
4.26	Clavier vertical (gauche) et <i>RearType</i> , clavier à l'arrière d'une tablette (droite).	165
4.27	Taille de la structure du keycube, à gauche, et aperçu d'un prototype final à droite.	167
4.28	Arrangement d'une disposition ortholinéaire, à gauche, et échelonnée à droite.	168
4.29	Capture d'écran du logiciel dédié au keycube (à gauche) et capture d'écran d'un logiciel de traitement de texte traditionnel (Microsoft Word) avec par-dessus le visualiseur du keycube (à droite).	170
4.30	Prototype du keycube (gauche) et logiciel pour l'étude utilisateurs 1 (droite) intégrant une disposition cubique bidimensionnelle dynamique.	173
4.31	Ensemble de positions à essayer : corps (debout, assis, en marchant), bras (pliés, relâchés, sens dessus dessous), appareil (de face, en diagonale).	174
4.32	Classement par importance des caractéristiques (1 = la moins importante, 9 = la plus importante) rapportées par leur moyenne (accompagnée de l'intervalle de confiance à 95 %).	175
4.33	Principales positions préférées de saisie de l'appareil, <i>en diagonale</i> (choisi à 77,4 %) à gauche et <i>de face</i> à droite.	176
4.34	Position de saisie de l'appareil avec les avant-bras fléchis et les auriculaires dessous pour empêcher la chute (à gauche) et avec les bras détendus, l'appareil retenu par l'ensemble des doigts (à droite).	177
4.35	Logiciel utilisé lors de l'étude utilisateurs 2 : accessibilité et préférence.	180
4.36	Cartographie des zones de préférence (doigt préféré et score par touche).	182

4.37	Cartes de chaleur des zones d'accessibilité avec le score par touche pour l'ensemble des doigts (à gauche) et avec le score pour le doigt corrélé à la préférence (à droite).	183
4.38	Disposition cubique (représentation bidimensionnelle) basée sur le QWERTY (à droite) accompagnée de la représentation symbolique de sa transformation tridimensionnelle (à gauche).	186
4.39	Disposition cubique des caractères basée sur l'AZERTY à gauche et Inconnue (basée sur la disposition DSK) à droite.	191
4.40	Capture d'écran de la partie visible du logiciel dédié à l'étude utilisateurs.	192
4.41	Participant utilisant le keycube dans la configuration de l'étude utilisateurs 3.	194
4.42	Vitesse de saisie de texte absolue à gauche et relative au clavier traditionnel à droite, par session et pour chaque disposition cubique.	196
4.43	Temps de frappe d'un caractère pour les dispositions cubiques QWERTY et AZERTY durant la dernière session du keycube (S5).	198
4.44	Taux d'erreur (gauche) et nombre de frappes par caractère (droite) par session pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel.	199
4.45	Score du NASA-TLX par dimension, à gauche, et total (brut) à droite pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel. . .	200
4.46	Score du SUS pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel avec les marges d'acceptabilité et les adjectifs qualificatifs. . .	201
4.47	Matériel utilisé pour l'étude utilisateurs 4, visiocasque de réalité augmentée (HoloLens de Microsoft), keycube et téléphone intelligent (Pixel de Google).	206
4.48	Interfaces visuelles de l'application dédiée à l'étude utilisateurs sur le visiocasque (de gauche à droite : avec le clavier virtuel, téléphone intelligent et keycube).	208
4.49	Configuration de l'étude utilisateurs, un participant debout utilisant chacune des interfaces (de gauche à droite : <i>Visiocasque</i> , <i>Téléphone intelligent</i> et <i>Keycube</i>).	209

4.50	Vitesse de saisie de texte pour chaque interface en valeur absolue (mots par minute) à gauche et relative au clavier traditionnel à droite.	211
4.51	Taux d'erreur (gauche) et nombre de frappes par caractère (droite) pour chacune des interfaces.	212
4.52	Charge de travail subjective rapportée par les scores du NASA-TLX pour chacune des interfaces.	212
4.53	Score du SUS pour chaque interface avec les marges d'acceptabilité et les adjectifs qualificatifs.	213
4.54	Taux d'utilisation des différents doigts lors de la saisie de texte avec le clavier traditionnel à gauche et le keycube à droite.	214
4.55	Moyenne des taux d'utilisation de tous les participants pour leur doigt le plus utilisé (1er) jusqu'à leur doigt le moins utilisé (8e), aucun participant n'a utilisé plus de 8 doigts.	215
4.56	Taux d'utilisation du doigt le plus utilisé par touche avec le clavier traditionnel (à gauche) et le keycube (à droite).	216
4.57	Utilisation d'un seul doigt pour appuyer sur les touches du keycube avec les trois faces (bleu, rouge et jaune) simultanément visibles et accessibles.	218
4.58	Comparaison de la vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère pour l'utilisation du keycube entre les conditions assis et debout.	219
4.59	Prototype du keycube, neutre, noir et blanc, à gauche, et logiciel de l'étude utilisateur avec retour visuel à droite.	222
4.60	Évolution par session de la vitesse de saisie de texte absolue et relative au clavier traditionnel, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère. Les coupures (espaces) des courbes représentent des pauses de 5 jours entre les sessions (30, 31 et 41, 42).	225
A.1	Projet <i>CARTON</i> : conception et construction.	239
A.2	Plan de la structure principale (1/2) du <i>CARTON</i> à imprimer sur une feuille de format AA ou Lettre.	241
A.3	Plan de la structure principale (2/2) du <i>CARTON</i> à imprimer sur une feuille de format AA ou Lettre.	242

A.4	Plan de la structure optionnelle (support du miroir) du <i>CARTON</i> à imprimer sur une feuille de format A4 ou Lettre.	243
B.1	Circuit électronique (composants et câblage) du keycube.	245
B.2	Vue en éclaté des composants principaux du keycube.	246
B.3	Scores d'accessibilité des touches pour chaque doigt.	247

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Any sufficiently advanced
technology is indistinguishable
from magic.¹

Arthur C. Clarke

Oh ! C'est magique.

Participant 1, 2, 3..., n

Les visiocasques de réalité augmentée permettent d'ajouter et d'intégrer des informations numériques à l'environnement réel, offrant aux utilisateurs des activités sensori-motrices et cognitives enrichissantes parfois perçues comme de la magie par les néophytes.

1.1 Motivation

Aussi séduisante que puisse être notre introduction des visiocasques de réalité augmentée, nous pensons que ces appareils finiront par être adoptés pour une

1. « Toute technologie suffisamment avancée est indiscernable de la magie. »

tout autre raison, celle-là même ayant justifié l’adoption massive des ordinateurs personnels et téléphones intelligents : un accès toujours plus rapide à l’information. Ainsi, nombreux sont ceux qui attendent et prédisent l’utilisation des visiocasques de réalité augmentée (Fink, 2017) dans plusieurs domaines déjà explorés par la recherche scientifique, par exemple la médecine (Sielhorst *et al.*, 2008), l’industrie et la maintenance (Palmarini *et al.*, 2018; Bottani et Vignali, 2019), l’éducation et la formation (Lee, 2012), le divertissement (Tan et Soh, 2010) et le domaine militaire (Livingston *et al.*, 2011). Dans ce contexte, certains acteurs préfèrent être proactifs, c’est le cas de notre partenaire industriel, la société OHRIZON spécialisée dans les expériences de réalité augmentée, qui a choisi d’initier des programmes de recherche conjoint avec le Laboratoire en Informatique Cognitive et Environnement de Formation (LICEF) de l’Université TÉLUQ et le Laboratoire d’Informatique de l’Université du Mans (LIUM) dans le but de démocratiser et exploiter les visiocasques de réalité augmentée.

D’abord intéressé par le potentiel grand public des visiocasques de réalité augmentée (par exemple dans une musée ou une salle de classe), mais freiné par les coûts prohibitifs (dépassant souvent plusieurs milliers de dollars canadiens ou d’euros par appareil) et la difficulté d’accès à la technologie (limité à certaines zones géographiques), nous avons conçu un visiocasque de réalité augmentée à faible coût avec des matériaux simples (Annexe A) et constructible par tous (Brun *et al.*, 2016), y compris les plus jeunes (Brun *et al.*, 2018). Avec ce projet, nommé CARTON, nous avons abordé la démocratisation des visiocasques de réalité augmentée d’un point de vue technocentré, axé sur le matériel, essentiellement en le rendant accessible. Cependant, nous avons très vite été confrontés aux problématiques d’usage dédié à ces appareils peu communs, le couple clavier-souris et l’écran tactile auquel nous ont habitués les ordinateurs personnels et téléphones intelligents ne sont pas les normes des interfaces utilisateurs dédiées aux visiocasques de réalité

augmentée. De fait, nous avons adopté une vision plus anthropocentrée, puis approché et situé le problème de démocratisation dans le domaine des interactions humain-machine, dont l’objectif principal est de concevoir, optimiser et étudier des interfaces (dispositif ou technique) entre l’utilisateur et un service ou produit, dans notre cas, un visiocasque de réalité augmentée.

Parallèlement, les terrains opérationnels de notre partenaire industriel pour l’exploitation des visiocasques de réalité augmentée ont évolué, allant de la maintenance d’éoliennes à l’inspection de centrales nucléaires, en passant par la gestion des rayons fruits et légumes de grandes et moyennes surfaces puis l’assistance et la formation de plombiers, de personnels hôteliers ou encore de techniciens de régie radiophonique. Ces changements nous ont dirigés d’une part vers l’exploitation de visiocasques de réalité augmentée déjà commercialisés, suffisamment robustes pour le milieu professionnel et, d’autre part, vers l’étude d’une activité générique commune à chacun des terrains : la saisie de texte. En effet, que ce soit pour un identifiant, un mot-clé, une annotation, un commentaire, un message ou un rapport, dans chacun des scénarios envisagés pour les cas applicatifs du partenaire industriel, les utilisateurs étaient toujours confrontés à la saisie de texte. Cependant, entre la saisie d’un simple message et celle d’un rapport, il y a souvent un contexte d’usage sensiblement différent, le premier cas peut s’opérer à l’extérieur, rapidement et avec peu d’attention, ce qui sera considéré comme déraisonnable et peu envisageable pour l’édition d’un rapport. Ainsi, nous avons décidé de limiter l’activité de saisie de texte à deux types d’environnement relativement génériques : industriel et de bureau (Figure 1.1).

Le premier environnement découle naturellement des différents terrains opérationnels de notre partenaire industriel. Plus particulièrement, le cas concret envisagé avec et pour le partenaire concerne l’inspection de centrale nucléaire, où l’utilisateur du visiocasque de réalité augmentée doit pouvoir bénéficier d’une aide et



Figure 1.1: Exemples d'utilisation d'un visiocasque de réalité augmentée dans des environnements de type industriel et de bureau. À gauche, une professionnelle accroupie utilise des outils pour réparer une machine, une fenêtre virtuelle flottante présente les conseils d'un expert. À droite, une professionnelle conçoit les plans d'une moto sur un ordinateur personnel puis manipule un rendu virtuel tridimensionnel ancré sur le bureau d'un espace partagé. Illustrations extraites des campagnes promotionnelles de l'HoloLens (1^{er} et 2^e génération) de Microsoft.

d'un suivi informatisé tout en gardant librement les mains, le regard et le corps, que ce soit pour manipuler des outils de contrôles (tel qu'un miroir télescopique), ou pour prendre différentes positions et naviguer à travers un terrain jugé difficile, souvent exigü, par exemple, accroupi entre de nombreuses traversées (conduits de transmission de fluides).

Le second environnement de travail poursuit notre but de démocratisation en étendant les cas d'usages du monde professionnel, au sens large, à l'ensemble des activités de bureau nécessitant de la saisie de texte. Par exemple, au-delà du bénéfice des réunions ou bureaux virtuels restituant avec minutie spatio-temporelle la majorité des entités les composant, les utilisateurs de visiocasques pourraient utiliser des logiciels de présentation assistée par ordinateur assurant ainsi une fluidité entre l'édition et la consommation du contenu virtuel, à l'instar des logiciels

respectant le principe du « tel écran-tel écrit (tel-tel) ² ». Le cas concret et scénario à l'origine de cet environnement concerne le développement d'applications de réalité augmentée pour visiocasques. Ce développement implique des allers-retours entre deux situations distinctes, d'un côté, en étant assis devant un bureau et de l'autre en étant debout, en mouvement, en interaction, en train d'expérimenter le résultat. À cet égard, nous envisageons de pouvoir développer directement les expériences de réalité augmentée avec et pour le visiocasque et ainsi fluidifier la conception en réalisant des modifications à la volée, lors des expérimentations. Cependant, cette activité de développement requiert une saisie de texte importante, d'où la nécessité d'avoir une interface adéquate. La Figure 1.2 résume l'évolution de notre motivation.

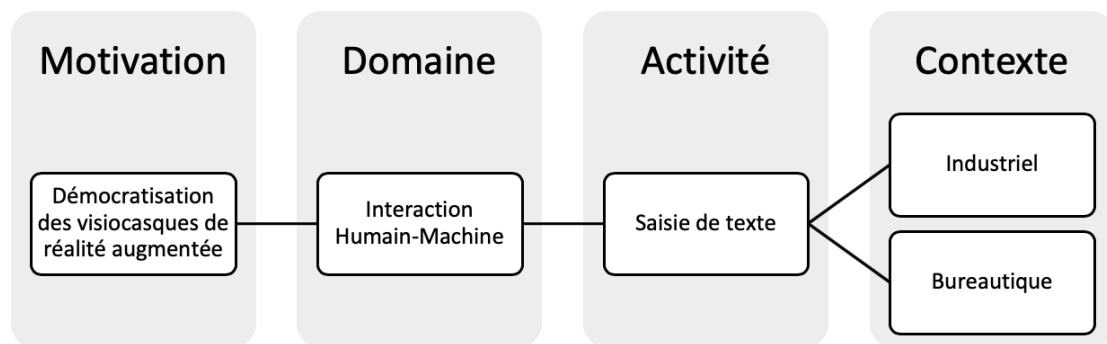


Figure 1.2: Résumé de notre évolution et précision de la motivation.

1.2 Problématique

Pour qu'une interface de saisie de texte soit massivement adoptée, elle doit permettre une vitesse d'entrée rapide et demander peu voire aucun apprentissage tout en permettant à l'utilisateur d'améliorer son efficacité avec plus de pratique

2. Plus connu sous son acronyme anglais WYSIWYG : *What You See Is What You Get* (littéralement « ce que vous voyez est ce que vous obtenez. »).

(Zhai et Kristensson, 2012; Kristensson, 2015). Ensuite, définie avec le partenaire industriel puis les spécialistes et professionnels accompagnant l'étude des scénarios envisagés, lorsqu'une interface de saisie de texte concerne un visiocasque de réalité augmentée, elle doit en plus être mobile et laisser à l'utilisateur une liberté de posture sans créer de fatigue. Enfin, les environnements industriels et de bureaux ajoutent leur lot de contraintes, à commencer par l'environnement sonore, dans un cas souvent bruyant ou au contraire requérant de la discrétion (pour des raisons de confidentialités ou de normes sociales), rendant l'usage de la voix difficile. De plus, l'environnement industriel oblige souvent les utilisateurs à utiliser des outils et autres appareils dans des espaces exigus et dangereux, et par là ajoute une contrainte physique, liberté des mains, mais aussi du regard pour être alerte des aléas de l'environnement. L'ensemble des dimensions contraignantes émanant des interfaces de saisie de texte pour les visiocasques de réalité augmentée est résumé sur la figure 1.3. L'importance de ces contraintes n'est pas égale et varie suivant les environnements d'utilisations, par exemple, dans le cas du bureau, l'accent pourra être porté sur la vitesse et la fatigue, car implique souvent des saisies de textes plus longues que dans un environnement industriel.



Figure 1.3: Dimensions contraignantes pour les interfaces de saisie de texte de visiocasques de réalité augmentée dans les environnements de type industriel et de bureau.

Après avoir réalisé plusieurs prototypes et essais informels d'applications avec un visiocasque de réalité augmentée professionnel (HoloLens de Microsoft, 1^{er} génération), nous avons constaté un réel problème concernant la saisie de texte. Cet appareil dispose par défaut de trois interfaces dédiées à la saisie de texte :

1. Un clavier virtuel flottant est affiché devant le regard de l'utilisateur, ce dernier utilise les mouvements de la tête pour cibler un caractère puis effectue un geste de la main en l'air pour saisir le caractère. Cette technique est lente, requière un retour et une attention visuelle importante puis fatigue rapidement les bras des utilisateurs par la nécessité du geste de la main en l'air, qui plus est, parfois inadéquat dans un contexte social (Hsieh *et al.*, 2016), y compris devant des collègues sur le lieu de travail (Rico et Brewster, 2010).
2. Un périphérique externe simple avec un seul bouton permet de remplacer le geste de la main du clavier virtuel, mais nécessite toujours de cibler les caractères avec la tête. Cette solution est mieux acceptée par les utilisateurs, car plus discrète et moins fatigante (le bras est libre d'être relâché) mais reste lente, visuellement contraignante et nécessite en plus de tenir un dispositif.
3. La reconnaissance vocale, permettant de saisir du texte en dictant les mots. C'est une solution utilisable sans les mains avec une vitesse de saisie rapide pour l'utilisateur, mais peu propice aux environnements bruyants (ex. dans une centrale nucléaire ou dans un environnement industriel similaire) ou au contraire dans un contexte social nécessitant d'être discret (ex. un bureau de travail partagé), que ce soit pour des raisons d'acceptation des autres (ex. des collègues et clients) ou de sécurité (ex. en saisissant des mots de passe et d'autres données confidentielles).

Ce constat confirmé par l'état de l'art n'est pas isolé (Derby *et al.*, 2019). Ils n'existent pas de norme concernant la saisie de texte pour les visiocasques de réalité augmentée, chaque constructeur propose des interfaces adaptées à leurs spécificités matérielles, ainsi, l'insatisfaction des interfaces de saisie de texte a été généralisée à l'ensemble des visiocasques de réalité augmentée par de nombreuses recherches (Vi, 2018), souvent motivée pour les mêmes raisons identifiées précédemment : vitesse, fatigue, acceptation, attention et occlusions visuelles, mais aussi apprentissage, mobilité et liberté des mains. Les différentes solutions proposées et ultérieurement présentées dans l'état de l'art, vont de l'usage du clavier traditionnel au suivi oculaire en passant par les périphériques spécifiques (ex. manettes, téléphones intelligents, gants, anneaux) et apportent leurs lots d'avantages et d'inconvénients suivant les contextes d'utilisation.

Problématique

- Quelles interfaces de saisie de texte pour visiocasques de réalité augmentée permettent de répondre aux dimensions contraignantes des environnements de travail de type industriel et de bureau ?

1.3 Hypothèses

Suite à la conception du prototype CARTON (un visiocasque de réalité augmentée à construire soi-même) et pour répondre aux besoins d'interactions de l'appareil, nous avons exploré l'utilisation conjointe du visiocasque de réalité augmentée avec une montre connectée (Brun *et al.*, 2017). Nous avons réalisé une étude comparative préliminaire entre l'utilisation des gestes de la tête, des gestes des doigts sur une surface tactile à même l'appareil puis des gestes des doigts sur la surface tactile d'une montre connectée. Dans notre configuration, les résultats se sont montrés favorables à l'utilisation d'une montre connectée pour interagir avec le

contenu de visiocasques de réalité augmentée (partie 3.1.7). La montre connectée est légère, discrète et à portée de mains sans pour autant les occuper, outre ses bénéfices ergonomiques, elle propose aux utilisateurs de visiocasque de réalité augmentée une surface tactile familière. Par ailleurs, l'état de l'art des saisies de texte sur montres connectées seules laisse supposer une vitesse de saisie suffisamment importante pour être envisagée dans un environnement industriel tout en répondant à l'ensemble des autres dimensions contraignantes (Figure 1.3).

Hypothèse 1

- Le visiocasque de réalité augmentée et la montre connectée forment un couple pertinent pour proposer une interface de saisie de texte efficace dans un environnement de travail industriel.

Par ailleurs, malgré le fort potentiel des montres connectées dans un environnement industriel impliquant des saisies de texte relativement courtes, nous pensons que sa limite de vitesse, et son utilisation mono manuelle seront un frein à leur utilisation pour la saisie de texte long et fastidieux plus couramment rencontré dans un environnement de bureau. Nous avons envisagé une autre approche complémentaire mettant l'accent sur la vitesse en minimisant la dimension liberté des mains. L'état général des interfaces de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée montre une tendance à exploiter le clavier traditionnel, apportant une familiarité, flexibilité et vitesse de saisie inégalée dans les environnements de bureau. Cependant, le clavier traditionnel souffre d'immobilité et nécessite un support horizontal (souvent un bureau), limitant significativement les possibilités et avantages d'utilisation de visiocasque de réalité augmentée. Nous tenons à respecter cette caractéristique primordiale et nous avons exploré une transformation du clavier traditionnel en adoptant une forme ayant déjà prouvé dans la littérature son bénéfice pour d'autres usages, notamment pour les manipulations

tridimensionnelles dans des environnements immersifs : le cube. Un contrôleur cubique permettrait de retrouver les mêmes avantages que le clavier traditionnel, un nombre et une taille de touches similaires, utilisable par l'ensemble des doigts, avec ou sans le regard, tout en étant de dimension raisonnable et surtout mobile, sans nécessité de support.

Hypothèse 2

- La transformation de forme du clavier traditionnel en passant d'une surface plane à une structure cubique représente une interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée efficace dans un environnement de travail de bureau.

1.4 Objectifs

Pour aborder la problématique définie et tester nos hypothèses, nous devons concrétiser et implémenter nos interfaces de saisie de texte, que ce soit sous forme de produit quasi fini pour satisfaire les besoins de notre partenaire industriel ou sous forme de prototype à expérimenter. Nous visons à :

- Concevoir un système (logiciel) proposant une interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée dans un environnement industriel.
- Concevoir un prototype (matériel et logiciel) d'une interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée dans un environnement de bureau.

Par ailleurs, au-delà de la concrétisation, nous devons :

- Mesurer l'efficacité des solutions avec des critères d'utilisabilité et de performance de saisie de texte puis les comparer avec l'état de l'art.

1.5 Méthodes de recherche

Pour remplir nos objectifs, en particulier la concrétisation des prototypes matériels et logiciels, nous avons initialement conceptualisé les interfaces indépendamment en réalisant et analysant l'état de l'art mis en perspective avec leur contexte d'utilisation respectif. Ensuite, nous avons suivi des méthodes de conception centrée sur l'utilisateur, par itération, nous avons mené des études expérimentales pour récolter puis analyser les données des utilisateurs et les impliquer dans la conception incrémentale des solutions. Enfin, de manière générale, nos travaux de thèse s'inscrivent dans les principes de la recherche empirique, basés sur l'observation et l'expérimentation. Nous résumons l'évolution de notre démarche entre la problématique et les méthodes de recherche sur la Figure 1.4.

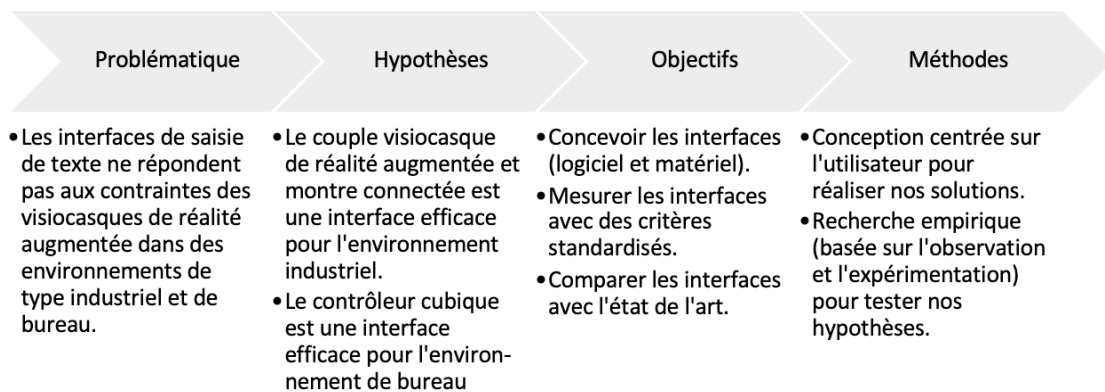


Figure 1.4: Résumé de notre approche, de la problématique aux méthodes.

1.6 Plan de thèse

La thèse s'articule autour de deux interfaces complémentaires : ControlWear (représentant le couple visiocasque de réalité augmentée et montre connectée) et le keycube (contrôleur cubique). Après le second chapitre, présentant un état de

l’art des interfaces de saisie de texte pour les visiocasques de réalité augmentée, nous abordons chacune des interfaces avec une structure relativement identique présentée sur le Tableau 1.1.

	CHAPITRE III	CHAPITRE IV
	ControlWear	Keycube
État de l’art spécifique	Saisie de texte sur montre connectée	Appareils interactifs cubiques
Description de la solution	Couplage visiocasque et montre connectée	Contrôleur cubique
Expérimentations	Études utilisateurs 1, 2 et 3 (<i>in situ</i> et laboratoire)	Études utilisateurs 1, 2, 3, 4 et 5 (conception et mesures)

Tableau 1.1: Structure de la thèse

Nous concluons cette thèse avec les contributions, limites et perspectives de nos travaux de recherche dédiés à la saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée, et de manière plus générale, à la démocratisation de ces derniers.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART DES INTERFACES DE SAISIE DE TEXTE POUR DES VISIOCASQUES

Le **casque** représente une catégorie d'objet reposant sur la tête de l'utilisateur.

Le **visiocasque** ajoute une dimension visuelle à l'objet, au moins un composant matériel affecte la perception visuelle de l'utilisateur (par exemple, un écran).

Le **visiocasque de réalité augmentée** ajoute la dimension de perception à l'appareil, au moins un composant matériel capte des informations du contexte de l'utilisateur (par exemple, une caméra), permettant d'offrir à ce dernier, des expériences de réalité augmentée (Figure 2.1).



Figure 2.1: Exemples de visiocasques pouvant offrir des expériences de réalité augmentée de qualité variable, de gauche à droite : Glass (Enterprise Edition) de Google, HoloLens (1^{er} génération) de Microsoft et Vive Pro de HTC.

Notre définition matérielle des visiocasques de réalité augmentée permet de satis-

faire trois requis (communément adoptés) définissant la réalité augmentée, (1) la combinaison (2) en temps réel et (3) tridimensionnelle du monde réel et virtuel (Azuma, 1997). Cependant, notre définition de ces appareils est aussi volontairement étendue pour inclure dans l'état de l'art des visiocasques dédiés à l'ensemble du continuum de réalité-virtualité (Figure 2.2), où se placent notamment, de part et d'autre, les expériences de réalité augmentée et de réalité virtuelle. Pour ces dernières, l'utilisateur est principalement immergé dans un environnement virtuel, avec une perception du monde réel très limitée (Milgram *et al.*, 1995). Nous justifions ce choix pour plusieurs raisons :

- La frontière matérielle entre la réalité augmentée et la réalité virtuelle est de plus en plus floue, avec des visiocasques pouvant parfois gérer l'une comme l'autre. Ainsi, les motivations et solutions des travaux concernant les interfaces de saisie de texte portant sur les visiocasques de réalité augmentée ou virtuelle peuvent être relativement similaires.
- La réalité virtuelle est technologiquement plus mature que la réalité augmentée, les travaux portant sur les interfaces de saisie de texte y sont plus nombreux.

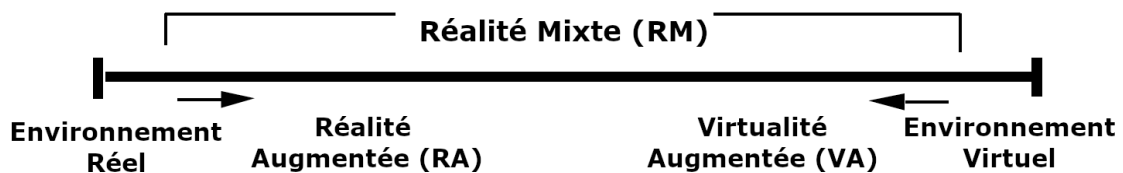


Figure 2.2: Représentation simplifiée du continuum réalité-virtualité. Illustration extraite (avec notre traduction) de (Milgram *et al.*, 1995).

Néanmoins, malgré le parallèle entre la réalité augmentée et la réalité virtuelle, pour cette dernière, la perception limitée du monde réel par l'utilisateur (notamment de ses mains) reste à considérer lors de l'élaboration, de l'étude puis de la comparaison des interfaces de saisie de texte pour visiocasque.

Par ailleurs, bien que le préfixe du terme *visiocasque* met en exergue la composante visuelle de ces appareils, les expériences de réalité augmentée peuvent affecter tout autant d'autres perceptions de l'utilisateur, par exemple, auditive.

Ce chapitre présentant l'état de l'art des interfaces de saisie de texte dédiées aux visiocasques de réalité augmentée est divisé en quatre parties. La première partie présente les critères principaux utilisés pour mesurer les interfaces de saisie de texte observées dans cet état de l'art. Les deux parties suivantes concernent **uniquement les descriptions et illustrations** d'interfaces reposant seulement sur le visiocasque puis de celles requérant un appareil externe. La dernière partie présente un **résumé général et une analyse** des résultats et caractéristiques des différents types d'interfaces.

Lorsqu'un appareil supplémentaire est ajouté directement sur le visiocasque, nous ne le considérons pas externe, tel qu'un dispositif miniaturisé de reconnaissance de mouvements des mains ou de suivi oculaire. Nous considérons un appareil comme externe lorsqu'il est physiquement séparé ou distant du visiocasque, tel qu'un clavier traditionnel ou même une manette filaire reliée au visiocasque. L'ensemble des travaux présentés fonctionnent de pair avec un visiocasque, ou ont été conçus pour cet usage. Les interfaces multimodales combinant plusieurs techniques (par exemple les gestes de la tête avec ceux des mains ou les gestes du regard avec l'appui d'un bouton physique externe) sont catégorisées ou sous-catégorisées suivant la modalité jugée plus importante et pertinente, représentant souvent la modalité permettant de sélectionner (choisir) les caractères ou les mots à saisir.

Pour chacune des sous-catégories :

- les travaux sont présentés dans l'ordre chronologique de publication, sauf exception, pour des raisons d'enchaînement et de compréhension générale,
- un tableau final résume les travaux présentés en rapportant leur vitesse

de saisie de texte lorsque disponible, en mots par minute (mpm). Dans la mesure du possible, nous avons adapté les rares résultats rapportés différemment.

2.1 Critères de mesures

Très souvent, les études des interfaces de saisie de texte prennent la forme d'expérimentations, du texte est présenté à des participants et ces derniers doivent le retranscrire le plus rapidement possible. Dans ces conditions, différents critères standardisés permettent de mesurer l'interface, par exemple en questionnant les participants et en observant et analysant leur activité.

Dans cette partie, nous présentons en détail uniquement les formules et méthodes des principaux critères rencontrés dans l'état de l'art que nous avons ensuite retenus pour mesurer nos interfaces *ControlWear* et *keycube* lors d'études utilisateurs présentées dans les deux chapitres subséquents.

2.1.1 Vitesse de saisie de texte

Le critère quasi systématiquement rapporté pour l'étude d'une interface de saisie de texte est la vitesse, que ce soit en caractères par seconde, en caractères par minute ou plus couramment en mots par minute.

Nous avons adopté la vitesse de saisie de texte en mots par minute (MPM) avec sa formule la plus communément utilisée et admise (Arif et Stuerzlinger, 2009) :

$$MPM = \frac{|T| - 1}{S} \times 60 \times \frac{1}{5}$$

T représente le texte transcrit (saisi), ainsi $|T|$ est la taille du texte rapportée en nombre de caractères, l'amputation d'un caractère (- 1) est justifiée car S, le temps en secondes, est calculé entre la saisie du premier et dernier caractère, ainsi

le temps pour saisir le premier caractère en est exclu. Un mot est défini comme une succession de 5 caractères, y compris l'espace.

À titre d'exemple et de référence, une récente étude en ligne (avec 168 960 participants) rapporte la moyenne de la vitesse de saisie de texte avec un clavier traditionnel à 51,56 (écart-type = 20,20) mots par minute (Dhakal *et al.*, 2018).

2.1.2 Taux d'erreur (et nombre de frappes par caractère)

La vitesse de saisie de texte est souvent accompagnée d'un taux d'erreur, mais les formules et méthodes pour calculer ce dernier sont plus nombreuses et moins universelles.

Nous avons adopté la formule du taux d'erreur (TE) basé sur la distance de Levenshtein entre deux chaînes de caractères (Soukoreff et MacKenzie, 2001) :

$$TE = \frac{DL(P, T)}{MAX(|P|, |T|)} \times 100$$

$DL(P, T)$ représente la distance de Levenshtein entre le texte présenté P et le texte transcrit T , c'est-à-dire, le nombre minimum de modifications (insertion, suppression et modification de caractère) pour passer d'un texte à l'autre. $MAX(|P|, |T|)$ retourne la taille (nombre de caractères) du texte le plus long entre P et T . Le taux d'erreur est rapporté en pourcentage et varie donc entre 0 (dans le meilleur cas, aucune erreur) et 100.

Pour pouvoir calculer ce taux d'erreur, il faut au minimum avoir un texte d'origine (P , le texte présenté) et autoriser les saisies d'erreurs, certaines procédures expérimentales ne permettent pas l'un ou l'autre, en particulier le dernier, en forçant les utilisateurs à corriger leurs erreurs avant de valider la saisie du texte.

Par ailleurs, même lorsque la saisie d'erreurs est autorisée, les participants peuvent décider de corriger toutes les erreurs commises, le taux d'erreur sera toujours à 0 %

et ne permettra pas de rapporter cet effort de correction. Ainsi, ce taux d'erreur est régulièrement accompagné du nombre de frappes par caractère (NFPC) pour mesurer les erreurs corrigées et se calcule de la sorte :

$$NFPC = \frac{|FE|}{|T|}$$

T est le texte transcrit (saisi) et FE représente le flux d'entrée, cela comprend tous les caractères (incluant l'espace), mais aussi les actions correctives. Pour une interface de saisie de texte tel que le clavier traditionnel où chaque frappe correspond à un caractère (pour un texte simple), le nombre de frappes par caractère optimal est de 1,0 (chaque frappe était juste), si une correction est effectuée, le nombre augmentera. Pour une interface de saisie de texte proposant une suggestion et saisie de mots complets tels qu'un clavier virtuel de téléphone intelligent, le nombre de frappes par caractère peut être inférieur à 1,0. À l'inverse, pour un texte équivalent, des interfaces peuvent nécessiter d'appuyer plusieurs fois sur une touche ou sur plusieurs touches pour saisir un seul caractère, leur nombre de frappes par caractère optimal sera supérieur à 1,0.

À l'opposé du taux d'erreur, pour calculer le nombre de frappes par caractère, il faut autoriser la correction d'erreurs, certaines procédures expérimentales ne permettent pas de corriger les erreurs commises, par conséquent le nombre de frappes par caractères est toujours optimal.

D'autres méthodes et formules pour calculer les taux d'erreur existent, par exemple, en considérant autant les erreurs corrigées et non corrigées dans un score unique, néanmoins la correction de l'utilisateur reste indiscernable lorsque le taux d'erreur est rapporté seulement sous cette forme (Soukoreff et MacKenzie, 2003).

2.1.3 Charge de travail

Ce critère n'est pas spécifique aux interfaces de saisie de texte, mais est adopté par de nombreuses études utilisateurs à l'ensemble du domaine des interactions humain-machine. La charge de travail représente le coût engagé par un opérateur humain pour atteindre un niveau de performance particulier sur la réalisation d'une tâche spécifique (Hart et Staveland, 1988). Le but d'une interface (de saisie de texte) est de causer la plus faible charge de travail sur l'utilisateur.

Nous avons adopté la méthode multidimensionnelle NASA Task Load Index (NASA-TLX) pour obtenir une mesure subjective de la charge de travail (Hart et Staveland, 1988). La méthode NASA-TLX comprend un questionnaire (Annexe C.2) avec des échelles de notation (sur 21 points) afin d'évaluer 6 dimensions : *Exigence Mentale*, *Exigence Physique*, *Exigence Temporelle*, *Performance*, *Effort*, *Frustration*. Dans le cas d'études utilisateurs d'interfaces de saisie de texte, ce questionnaire est le plus souvent administré aux participants juste après qu'ils aient effectué la retranscription (saisie) de texte avec une interface.

Dans sa version originelle, le score final de charge de travail est calculé en considérant une pondération des dimensions. La pondération est réalisée en présentant les dimensions par paire (soit 15 au total) et en demandant aux participants de choisir (pour chaque paire) la dimension qui a le plus contribué à la charge de travail pour la tâche venant d'être réalisée. Le score de charge de travail *brut* est plus souple et se dispense de cette étape de pondération en calculant uniquement une addition ou une moyenne de l'ensemble des scores de chaque dimension relevée par le questionnaire (Hart, 2006).

D'autres méthodes existent allant au-delà de celles basées sur les questionnaires, par exemple en interprétant différentes mesures physiologiques, telles que les va-

riations de la fréquence cardiaque ou du diamètre pupillaire. Ces méthodes sont plus contraignantes à mettre en place et sont moins courantes pour mesurer des interfaces de saisie de texte.

2.1.4 Utilisabilité

L'utilisabilité est le dernier critère présenté et comme la charge de travail il n'est pas spécifique aux interfaces de saisie de texte, mais est adopté par de nombreuses études utilisateurs de l'ensemble du domaine des interactions humain-machine. D'après l'organisation internationale de normalisation (l'ISO), l'utilisabilité représente la mesure à laquelle un produit peut être utilisé par des utilisateurs spécifiques pour atteindre des objectifs spécifiques avec efficacité, efficience et satisfaction dans un certain contexte d'utilisation (International Organization for Standardization, 2019).

Nous avons adopté la méthode la plus commune, le SUS (de l'anglais « System Usability Scale »), pour mesurer subjectivement l'utilisabilité de nos interfaces (Brooke, 1996). La méthode SUS comprend un questionnaire (Annexe C.1) avec seulement 10 questions présentées sous la forme d'échelle de Likert (pour donner un degré d'accord ou désaccord d'une affirmation) variant entre 1 et 5. La méthode SUS inclut une formule (présent dans l'annexe) permettant de calculer un score d'utilisabilité final variant entre 0 (mauvais) et 100 (bon, souhaitable). Ce score final peut être mis en perspective avec d'autres produits de la vie de tous les jours (Kortum et Bangor, 2013), notamment en le plaçant sur des échelles d'acceptabilités accompagnées d'adjectifs qualificatifs (Bangor *et al.*, 2009).

De nombreux questionnaires alternatifs permettent de mesurer l'utilisabilité d'une interface humain-machine (Assila *et al.*, 2016), parfois spécifique à certains produits, services ou contextes.

2.2 Saisie de texte en utilisant le visiocasque seul

Dans cette partie, nous présentons les techniques se reposant seulement sur le visiocasque, elles sont sous-catégorisées par type de gestuelle utilisé pour saisir du texte : avec les mains, la tête, le regard et tactile.

2.2.1 Gestes de la (ou des) main(s)

Par geste de la main, nous considérons toutes gestuelles impliquant un mouvement d’au moins une main et de ses composants (essentiellement les doigts) sans avoir à toucher le visiocasque, par exemple, en effectuant des gestes avec les mains en l’air.

La plupart des visiocasques disposent d’au moins une caméra dirigée dans la même direction que le champ de vision de l’utilisateur, cela permet notamment à l’appareil de capturer la présence des mains et leurs mouvements ou gestuelles. Par ailleurs, certains visiocasques intègrent des caméras stéréoscopiques et d’autres capteurs de profondeur permettant d’améliorer sensiblement la précision de détection des mains jusqu’aux moindres mouvements des doigts.

ARKB est un clavier virtuel QWERTY¹ affiché en réalité augmentée par la reconnaissance d’un marqueur fiduciaire (un point de référence ou de mesure, par exemple un logo imprimé sur une feuille). Les utilisateurs doivent déposer des marqueurs de couleurs sur le bout des doigts afin de simplifier leur détection et suivi (Figure 2.3). Un caractère est saisi lorsque le bout d’un doigt entre virtuellement en collision avec une touche du clavier. Les auteurs n’ont pas mesuré les performances de saisie de texte (Lee et Woo, 2003).

1. QWERTY est le nom d’une disposition standardisée des touches de clavier pour l’alphabet latin, le nom représente l’enchaînement des 6 premières lettres (en partant du haut à gauche).

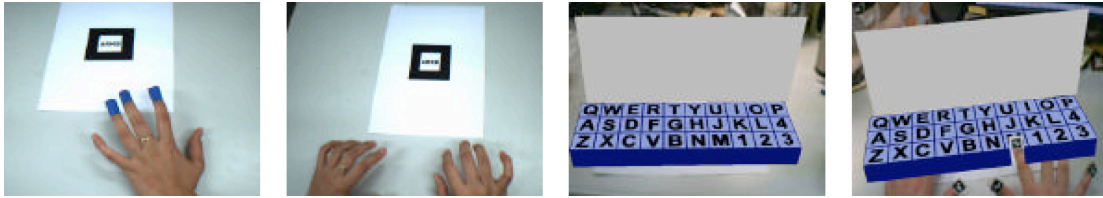


Figure 2.3: ARKB. Marqueur de couleur sur le bout des doigts, marqueur fiduciale et clavier virtuel. Illustration extraite de (Lee et Woo, 2003).

Air Typing est un clavier virtuel (QWERTY) utilisant uniquement la caméra classique du visiocasque. Le clavier présenté est séparé en deux parties (équitablement entre la gauche et la droite) affectées respectivement à chacune des mains (Figure 2.4). Le suivi des mouvements verticaux des mains permet de cibler des groupes horizontaux de 5 caractères (par exemple *QWERT* ou *ASDFG*), ensuite la sélection et saisie du caractère s'effectue en abaissant le doigt respectif (par exemple le pouce de la main gauche pour le caractère le plus à droite tel que *T* ou *G*). Les auteurs ont implémenté une variante utilisable avec une seule main, nécessitant en plus des mouvements horizontaux, pour passer d'une partie à l'autre (Chang *et al.*, 2014).



Figure 2.4: *Air Typing*. Disposition monomanuel et bimanuel du clavier virtuel. Illustration extraite de (Chang *et al.*, 2014).

Pour pallier les limites de précision d'une caméra classique, une approche consiste à ajouter un dispositif spécialisé dans la reconnaissance des mouvements des mains

et doigts (tel que *Leap Motion*) directement sur le visiocasque. Deux implémentations similaires (Kwon *et al.*, 2016; Speicher *et al.*, 2018) consistent à présenter un clavier virtuel (QWERTY) flottant, utilisable avec deux doigts (de mains différentes) pour potentiellement accélérer la saisie des caractères (Figure 2.5). Cette dernière s’opère lorsqu’un des doigts effectue un geste d’appui (dans le vide) et entre en collision avec une touche virtuelle. La seconde version du visiocasque de réalité augmentée *HoloLens* de Microsoft intègre une interface de saisie de texte similaire (sans ajout de matériel personnalisé).



Figure 2.5: Utilisation d’un dispositif complémentaire de reconnaissance des mouvements. Illustration extraite de (Kwon *et al.*, 2016).

FistPointer est une technique utilisant uniquement la caméra classique, en synchronisant les déplacements du poing en l’air avec celui d’un pointeur. Le traitement des images de la caméra permet aussi de détecter l’abaissement du pouce pour effectuer une action, tel que la saisie d’un caractère (Figure 2.6). Les auteurs ont montré (en vidéo) le potentiel de cette approche avec un clavier virtuel (QWERTY), mais n’ont pas donné d’explication sur l’implémentation, ni mesuré les performances de saisie de texte (Ishii *et al.*, 2017).

VISAR est un clavier virtuel (QWERTY) flottant utilisable avec un doigt en l’air (Figure 2.7). L’index (tendu) permet de déplacer un pointeur vers une touche virtuelle (pour la sélectionner) et un geste du doigt (en le rabaissant) permet de saisir le caractère sélectionné. Les auteurs ont implémenté leur solution avec le

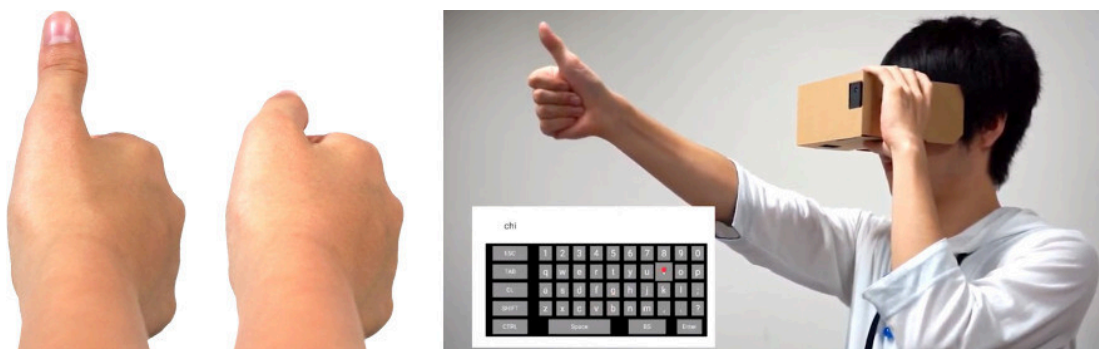


Figure 2.6: *FistPointer*. Position du pouce pour sélectionner puis « cliquer » (métaphore de l'appui sur un bouton). Illustration extraite de (Ishii *et al.*, 2017).

visiocasque *HoloLens* (1^{er} génération) de Microsoft, intégrant des caméras de profondeur pour une meilleure précision. *VISAR* inclut la suggestion de mots et une tolérance aux erreurs de frappes (autocorrection) permettant notamment de rapprocher les touches virtuelles entre elles et ainsi réduire l'espace visuel nécessaire au clavier (Dudley *et al.*, 2018).

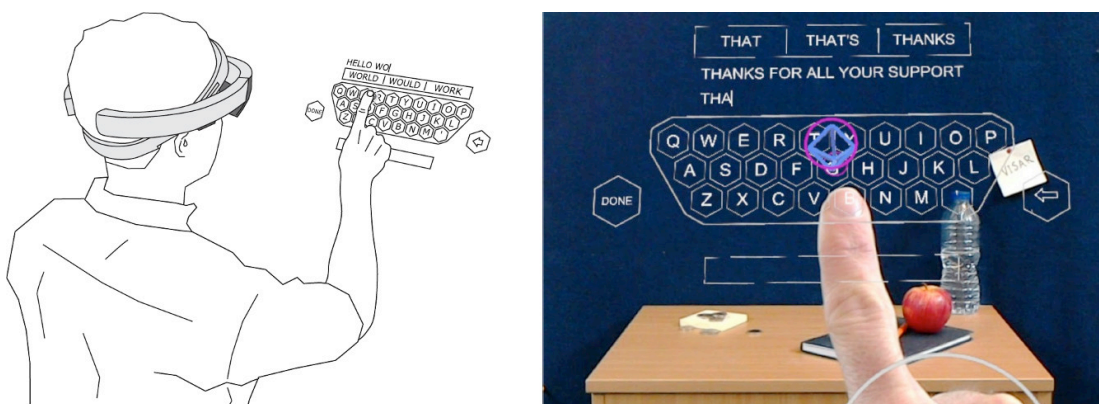


Figure 2.7: *VISAR*. Utilisateur saisissant du texte et vue du clavier *VISAR* à travers le visiocasque (Microsoft HoloLens). Illustration extraite de (Dudley *et al.*, 2018).

PalmFlick et *MidAirFlick* sont des implémentations d'un clavier non traditionnel (*Flick*) dédié à l'écriture japonaise et basé sur la combinaison de consonnes et voyelles formant les phonèmes (Figure 2.8). La solution est motivée par la

nécessité de proposer une interface requérant peu d'espace visuel. Le clavier est soit flottant, soit synchronisé avec la paume d'une main. Les auteurs rapportent une performance (vitesse d'écriture et taux d'erreur) moindre pour leur version utilisant la paume car le chevauchement des mains causait de fausses détections d'appuis (Ogitani *et al.*, 2018).

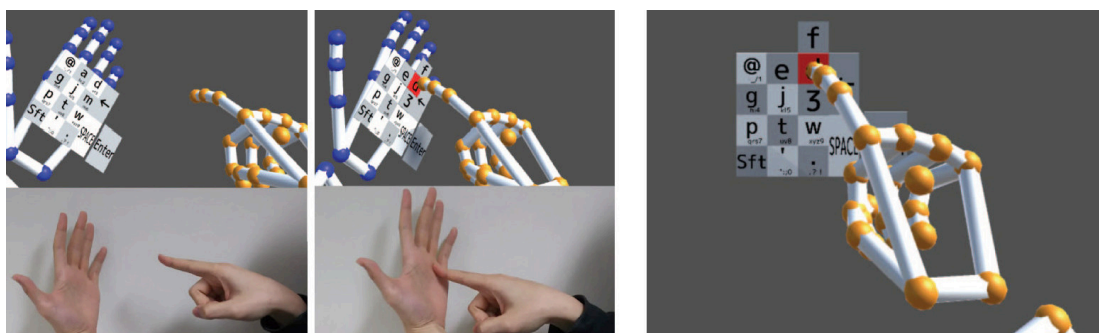


Figure 2.8: *PalmFlick* et *MidAirFlick*. Détection des appuis sur la paume de la main ou en l'air. Illustration extraite de (Ogitani *et al.*, 2018).

D'autres encore ont proposé un clavier virtuel incluant la technique de saisie de mots par gestuelle (Figure 2.9). Cette approche, couramment implémentés sur les claviers virtuels des téléphones intelligents (Zhai et Kristensson, 2012), permet de saisir un mot entier avec une seule action. La procédure consiste à sélectionner le premier caractère du mot souhaité (dans leur cas, en pointant la main vers la touche virtuelle, avec un curseur comme retour visuel), puis à activer le premier caractère (en effectuant un geste de pincement) et passer par tous les autres caractères du mot pour désactiver après le dernier caractère (en relâchant le pincement). Les auteurs n'ont pas mesuré les performances de saisie de texte de leur interface (Jimenez et Schulze, 2018).

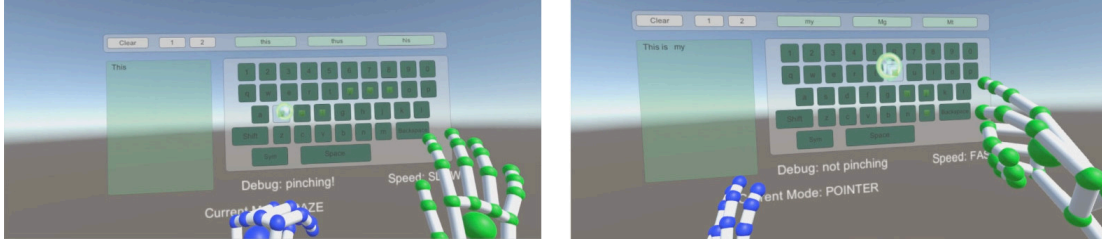


Figure 2.9: Geste de la main avec la technique de saisie gestuelle. Illustration extraite de (Jimenez et Schulze, 2018).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>ARKB</i> (Lee et Woo, 2003)	-
<i>Air Typing</i> , en utilisant seulement la caméra classique (Chang <i>et al.</i> , 2014)	15,0
Appui dans le vide (Kwon <i>et al.</i> , 2016)	-
Appui dans le vide (Speicher <i>et al.</i> , 2018)	9,8
<i>FistPointer</i> , en utilisant seulement la caméra classique (Ishii <i>et al.</i> , 2017)	-
<i>VISAR</i> , avec l'HoloLens de Microsoft (1 ^{er} génération) (Dudley <i>et al.</i> , 2018)	17,8
<i>PalmFlick</i> et <i>MidAirFlick</i> (Ogitani <i>et al.</i> , 2018)	6,0
Saisie de mots par gestuelle des mains dans le vide (Jimenez et Schulze, 2018)	-

Tableau 2.1: Résumé de la sous-catégorie Gestes de la (ou des) main(s).

2.2.2 Gestes de la tête

Les visiocasques intègrent une centrale inertielle permettant de mesurer les mouvements (tel que les translations et rotations) caractérisant les gestes de la tête.

Le déplacement continu d'un pointeur placé au centre du champ de vision et basé sur les mouvements de rotation de la tête reste l'utilisation la plus courante des gestes de la tête avec un visiocasque et fut d'abord utilisé pour contrôler *Dasher*, une interface de saisie de texte peu conventionnelle (Figure 2.10, droite). L'interface *Dasher* fonctionne en déplaçant un curseur vers des zones (surfaces) correspondantes aux caractères. Les zones sont plus ou moins grandes selon la

probabilité du caractère assigné d'être le suivant (Ward *et al.*, 2000). Les auteurs de l'adaptation pour visiocasque n'ont pas donné d'explications sur leur implémentation (McCall *et al.*, 2015).

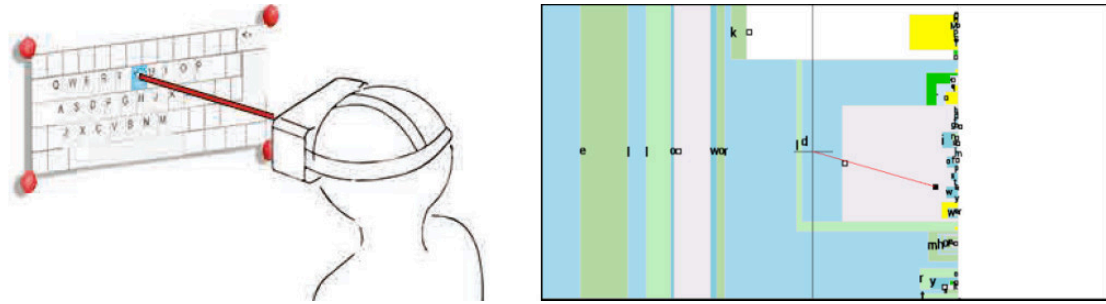


Figure 2.10: Geste de la tête comme pointeur (gauche) et implémentation de l'interface Dasher sur visiocasque (droite). Illustration extraite de (Speicher *et al.*, 2018; McCall *et al.*, 2015).

D'une manière plus classique, d'autres auteurs ont utilisé les mouvements de rotation de la tête pour déplacer le pointeur sur un clavier virtuel (QWERTY) flottant présenté devant l'utilisateur, le pointeur permettant de sélectionner les caractères (Figure 2.10, gauche). *TapType*, *DwellType* et *GestureType* représentent trois façons différentes de saisir des caractères sélectionnés par le pointeur :

- *TapType*, en appuyant sur un bouton physique externe, dans leur cas, d'une manette classique (Figure 2.11, droite).
- *DwellType*, en fixant le caractère sélectionné pendant une durée minimum définie (représentant un seuil à dépasser), dans leur cas, 400 ms.
- *GestureType* inclut la saisie de mots par gestuelle (Figure 2.11, gauche), le passage par les différents caractères s'effectue avec le geste de la tête, tandis que l'activation et désactivation respective du premier et dernier caractère s'opère en appuyant et relâchant un bouton physique externe.

Les auteurs ont mené une étude comparative et rapportent une similitude des retours subjectifs concernant la fatigue, l'apprentissage et la préférence, mais une

meilleure vitesse de saisie de texte pour la technique *GestureType* (Yu *et al.*, 2017).

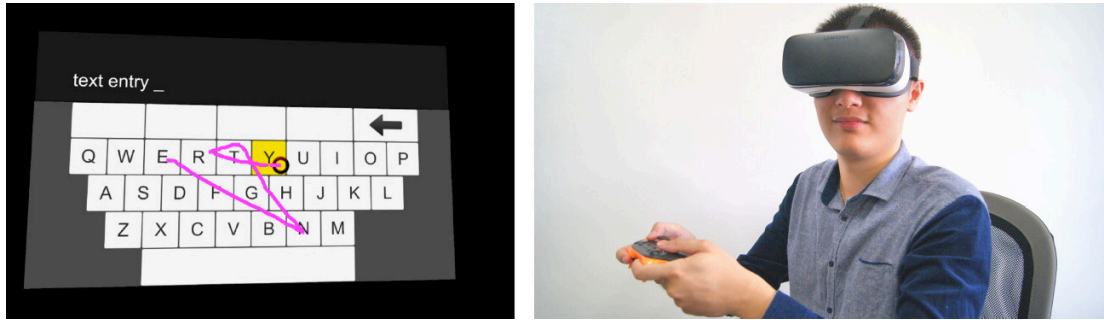


Figure 2.11: Clavier virtuel de l'interface *GestureType* (similaire pour *TapType* et *DwellType*). Illustration extraite de (Yu *et al.*, 2017).

D'autres auteurs ont implémenté une technique similaire à *TapType* et rapportent des signalements de douleurs au cou par les participants (Speicher *et al.*, 2018).

Le visiocasque *HoloLens* (1^{er} génération) de Microsoft implémente par défaut le déplacement d'un curseur sur un clavier virtuel par mouvement de la tête et propose deux types de saisie : soit en appuyant sur un bouton physique externe (d'une manette dédiée à cet usage) soit en effectuant un geste de la main en l'air. Ces deux techniques ont été comparées et les auteurs rapportent que la solution utilisant le bouton externe est plus performante (en termes de vitesse d'écriture) et moins fatigante pour les bras et doigts (Derby *et al.*, 2019).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
Interface <i>Dasher</i> avec les gestes de la tête (McCall <i>et al.</i> , 2015)	2,1
<i>GestureType</i> , vitesse rapportée au niveau expert (Yu <i>et al.</i> , 2017)	24,7
Rotation de la tête avec appui de bouton physique (Speicher <i>et al.</i> , 2018)	10,2
<i>HoloLens</i> de Microsoft (v. 1) avec main en l'air ; bouton physique (Derby <i>et al.</i> , 2019)	5,4 ; 6,6

Tableau 2.2: Résumé de la sous-catégorie Gestes de la tête.

2.2.3 Gestes du regard

Par geste du regard, nous considérons tout mouvement des yeux permettant d'interagir avec les applications déployées sur les visiocasques. Les technologies de suivi oculaire pour visiocasques sont soit directement intégrées par le constructeur de l'appareil (de plus en plus courant), soit ajoutées par un système d'oculométrie supplémentaire dédié aux visiocasques.

Une première implémentation de gestuelle du regard dédiée à la saisie de texte pour visiocasque s'est concrétisée avec un clavier virtuel (QWERTY) flottant (Figure 2.12). La sélection des caractères s'effectue avec un pointeur suivant le regard de l'utilisateur. La saisie du caractère sélectionné s'effectue en fixant une touche virtuelle au-delà d'un seuil (550 ms), cette durée est nécessaire pour éviter de saisir des caractères de manière incontrôlés et involontaires dès lors que le regard croise un bouton virtuel, un problème communément comparé à la malédiction du Roi Midas (Jacob, 1991). Les auteurs ont aussi surmonté ce problème en implémentant la saisie du caractère sélectionné par l'appui d'un bouton physique externe. Ils ont ensuite mené une étude comparative entre les différentes techniques de saisie et plusieurs présentations visuelles de clavier virtuel (plat-condensé ou courbé-étiré) et environnements (stable ou dynamique). Ils rapportent que les meilleures

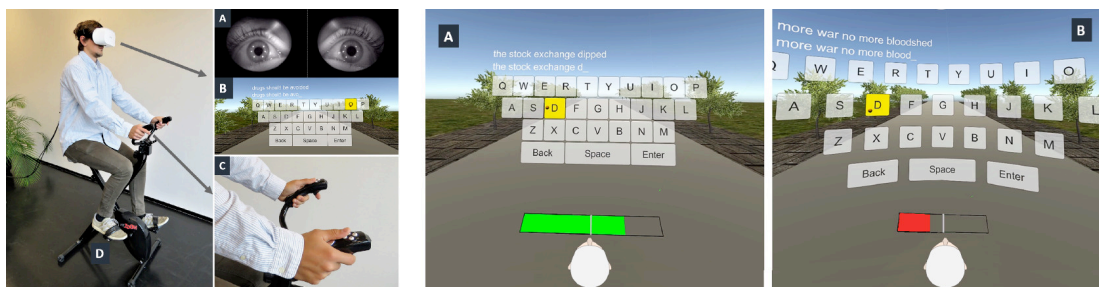


Figure 2.12: Gestuelle du regard avec clavier virtuel plat-condensé et courbé-étiré. Illustration extraite de (Rajanna et Hansen, 2018).

performances sont obtenues en étant stables, avec le bouton physique et le clavier plat condensé. Cependant, peu importe la situation, ils ont soulevé des problèmes d'imprécisions causés par des mouvements du visage (par exemple en souriant ou parlant), nécessitant parfois de nouvelles calibrations (Rajanna et Hansen, 2018).

À cet égard, dans une autre étude, le suivi du regard a été fusionné avec une interface neuronale et un visiocasque dans le but d'améliorer la précision du ciblage des caractères d'un clavier virtuel. Les auteurs n'ont pas expliqué comment saisir les caractères et déclarent seulement une vitesse de saisie de texte potentielle sans avoir mené d'études empiriques (Ma *et al.*, 2018).

Toujours pour minimiser les problèmes d'imprécision du suivi oculaire, d'autres auteurs ont implémenté une saisie de texte multimodale en deux étapes, avec d'abord la sélection d'un groupe de touches virtuelles par le regard (offrant une zone cible plus grande qu'une seule touche), puis du choix et saisie du caractère final par un geste tactile sur la branche d'un visiocasque (Figure 2.13). Les auteurs rapportent que leur solution offre une meilleure performance (en termes de vitesse d'écriture) que des approches similaires exploitant une seule des modalités : gestes du regard ou tactiles (Ahn et Lee, 2019).

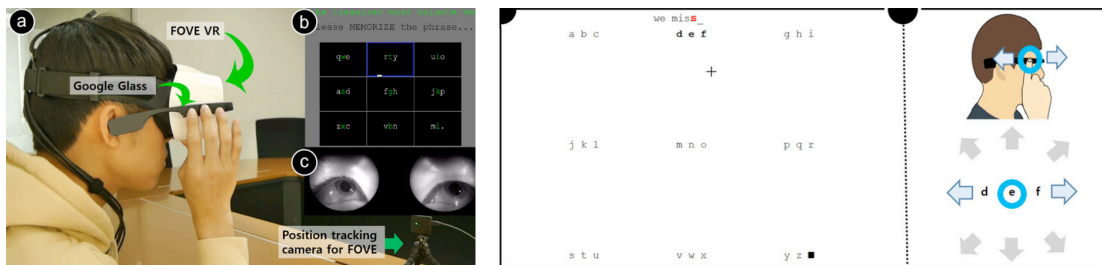


Figure 2.13: Interface multimodale entre le suivi oculaire et le geste tactile. Illustration extraite de (Ahn et Lee, 2019).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
Saisie par fixation du regard ; ou bouton physique (Rajanna et Hansen, 2018)	9,4 ; 10,2
Combinaison d'occulométrie et interface neuronale (Ma <i>et al.</i> , 2018)	-
Combinaison d'occulométrie et appui tactile (Ahn et Lee, 2019)	11,0

Tableau 2.3: Résumé de la sous-catégorie Gestes du regard.

2.2.4 Gestes tactiles

Par gestes tactiles, nous considérons tout mouvement des doigts (par exemple des glissements ou tapotements) effectués sur une surface tactile présente sur le visiocasque.

Certains constructeurs intègrent des surfaces tactiles à même le visiocasque (souvent sur le côté de l'appareil). *SwipeZone* est une interface de saisie de texte inspiré de *Swipeboard* (Chen *et al.*, 2014) exploitant cette surface tactile intégrée. La technique originelle dédiée aux petites surfaces tactiles fonctionne en deux temps (actions), un premier glissement (dans 8 directions en incluant horizontal, vertical et les diagonales) ou tapotement (un simple appui) permet de choisir un des 9 groupements de 3 caractères, puis un deuxième glissement ou tapotement pour sélectionner et saisir le caractère. La variante implémentée par les auteurs (Figure 2.14) supprime les glissements diagonaux en regroupant les ensembles de caractères dans trois zones distinctes sur la surface tactile (Grossman *et al.*, 2015).

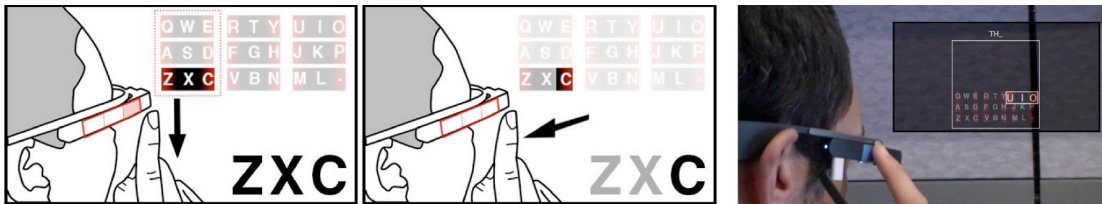


Figure 2.14: *SwipeZone*. Interface de saisie de texte en deux temps sur surface tactile. Illustration extraite de (Grossman *et al.*, 2015).

Pour répondre à la contrainte de taille réduite de la surface tactile disponible sur les visiocasques, *1D Handwriting* est une interface de saisie de texte basé sur des gestes mono dimensionnels inspirés de l'écriture des lettres manuscrites (en minuscule) nécessitant d'effectuer des glissements continus d'un doigt sur un seul axe (Figure 2.15). Les auteurs ont aussi implémenté sur visiocasque une technique adaptée du clavier *1Line* (Li *et al.*, 2011), un clavier qui rassemble 3 caractères sur une seule touche (virtuelle) à partir de la disposition QWERTY. La sélection des touches s'effectue avec un glissement à un doigt, puis la sélection d'un caractère sur une touche s'effectue avec un glissement à deux doigts, suivi d'un tapotement à deux doigts pour saisir le caractère (Yu *et al.*, 2016). Pour chacune des solutions implémentées, ils ont aussi proposé la fonctionnalité de suggestion des mots.

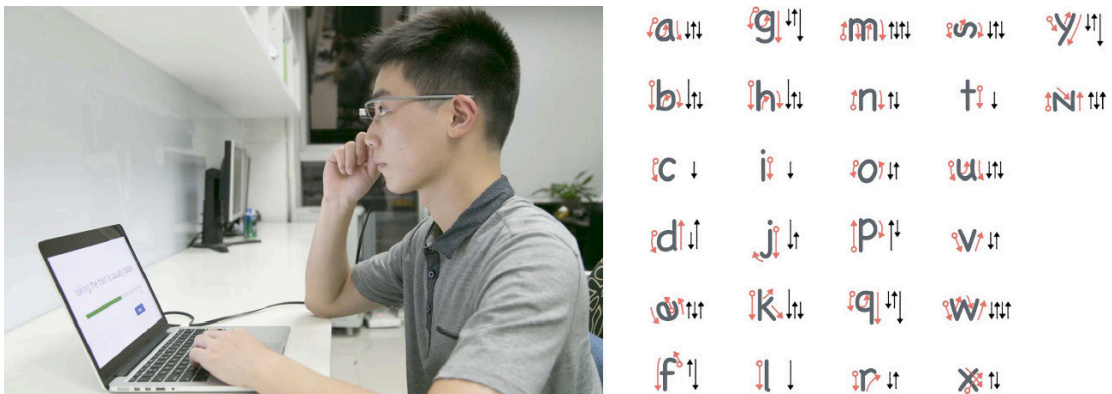


Figure 2.15: *1D Handwriting*. Écriture manuscrite mono directionnelle sur surface tactile. Illustration extraite de (Yu *et al.*, 2016).

FaceTouch est une interface exploitant les faces non utilisées des visiocasques en y ajoutant une surface tactile (Figure 2.16). Les auteurs ont défini empiriquement que le meilleur endroit (selon les taux d'erreur, les temps de sélection, l'utilisabilité, la charge de travail et la fatigue) était de *face* (par rapport à de *côté* ou dans les *mains*), du moins pour des expériences de réalité virtuelle. Ils ont implémenté un scénario de saisie de texte avec un clavier virtuel (QWERTY) séparé en deux (équitablement entre la partie droite et gauche), des curseurs suivent le

déplacement des doigts touchant la surface tactile et permettent de sélectionner les caractères, ces derniers sont saisis lorsque les doigts quittent la surface tactile. Les auteurs ont seulement mené une étude informelle pour mesurer la vitesse de saisie de texte (Gugenheimer *et al.*, 2016).

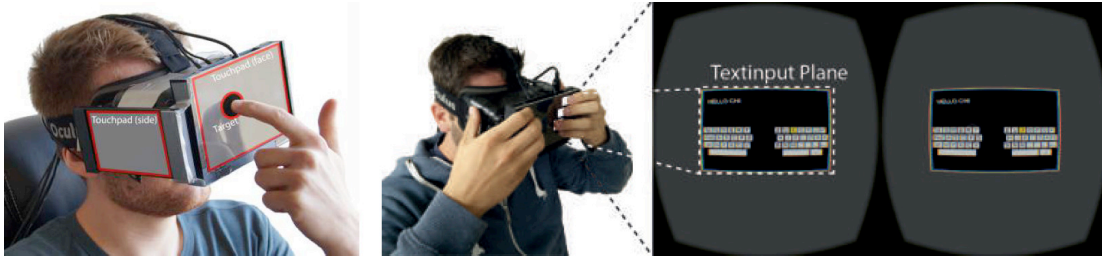


Figure 2.16: *FaceTouch*. Interface tactile complémentaire placée directement sur le visiocasque. Illustration extraite de (Gugenheimer *et al.*, 2016).

Nous avons catégorisé *CheekInput* comme geste tactile par simplification, car cette technique nécessite aussi d'approcher les mains proches du visage, mais pour toucher non pas directement le visiocasque, mais les joues (Figure 2.17). Plusieurs capteurs photo-réfléchissants ont été placés sur la partie intérieure du visiocasque pour détecter les déformations des joues par la pression des doigts dans 4 directions. Les auteurs ont proposé (sans l'implémenter) d'utiliser leur technique pour créer une interface de saisie de texte, en sélectionnant des groupes de lettres avec une joue et en saisissant la lettre finale avec l'autre (Yamashita *et al.*, 2017).



Figure 2.17: *CheekInput*. Interface tactile basée sur les déformations des joues. Illustration extraite de (Yamashita *et al.*, 2017).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>SwipeZone</i> , saisie de texte en deux temps (Grossman <i>et al.</i> , 2015)	8,7
<i>1D Handwriting</i> , inclut la suggestion de mots (Yu <i>et al.</i> , 2016)	9,7
<i>FaceTouch</i> (Gugenheimer <i>et al.</i> , 2016), vitesse rapporté pour une étude informelle	10,0
<i>CheekInput</i> , déformations des joues (Yamashita <i>et al.</i> , 2017)	-

Tableau 2.4: Résumé de la sous-catégorie Gestes tactiles.

2.3 Saisie de texte avec un périphérique externe au visiocasque

Nous regroupons ici toutes les techniques reposant sur un appareil spatialement externe au casque lui-même, en les catégorisant par type d'appareil.

2.3.1 Clavier traditionnel

De nombreuses études rapportent l'histoire, l'évolution, les caractéristiques et les performances des claviers traditionnels (Noyes, 1983b). Dans les environnements de bureau, ces appareils dédiés à la saisie de texte n'ont pas d'équivalent en matière de performances.

Naturellement, plusieurs recherches ont exploité les claviers traditionnels avec des visiocasques principalement dédiés aux expériences de réalité virtuelle, avec pour but de résoudre la problématique de visibilité réduite (ou inexistante) des mains et du clavier. Dans cette condition, de nombreuses recherches (Kim *et al.*, 2004; Walker *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2017; Hoppe *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2018; Knierim *et al.*, 2018; Bovet *et al.*, 2018; Grubert *et al.*, 2018a; Grubert *et al.*, 2018b) concernent essentiellement l'étude du retour visuel des mains (Figure 2.18). Les implémentations se font souvent par l'intermédiaire d'un appareil de reconnaissance des mouvements externes (déposé à côté du clavier) ou directement sur le visiocasque. Les performances rapportées par les auteurs varient grandement et

permettent aux utilisateurs d'atteindre plus de 80 % de leur vitesse d'écriture sans visiocasque.

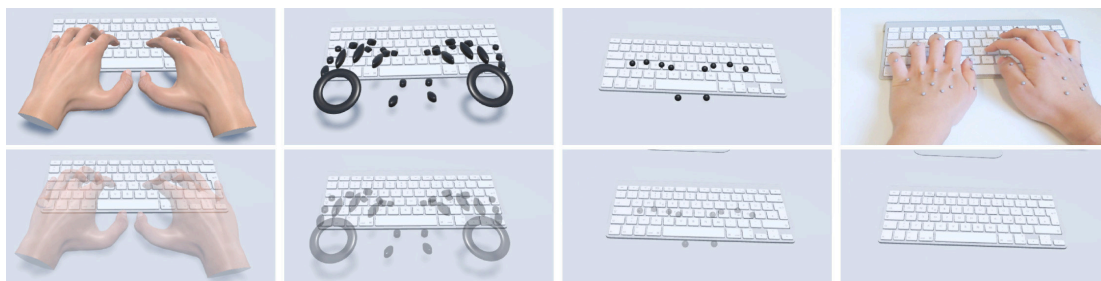


Figure 2.18: Le clavier traditionnel en réalité virtuelle, étude des effets du retour visuel des mains, qu'elles soient opaques ou semi-transparentes, réalistes, symboliques, représentées seulement par le bout des doigts ou réelles. Illustration extraite de (Knierim *et al.*, 2018).

Dans le cas d'expérience de réalité augmentée, les mains et le clavier peuvent être directement visibles, sans transformation, de fait les performances sont supposées être les mêmes qu'avec un autre dispositif visuel (tel qu'un écran de bureau). À cet égard, une expérience de *virtualité augmentée* (caractérisée par l'intégration d'entités réelles dans un environnement virtuel) a été considérée avec un visiocasque (McGill *et al.*, 2015), en ajoutant dans un monde virtuel le clavier et les mains de l'utilisateur sans adaptation (Figure 2.19). Les auteurs rapportent une vitesse de saisie de texte d'environ 65 % de celle hors visiocasque.

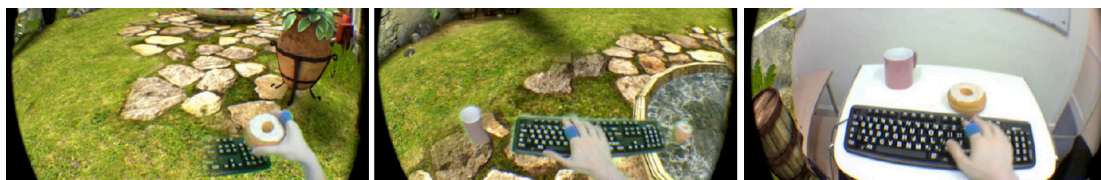


Figure 2.19: Virtualité augmentée pour intégrer le clavier traditionnel. Illustration extraite de (McGill *et al.*, 2015).

Dans une autre étude, les touches du clavier traditionnel ont été rendues sensibles au toucher (à l'effleurement) des doigts en ajoutant une matière conductrice sur

leur surface (Figure 2.20). Cette technique permet de connaître l’emplacement du bout des doigts sur les touches avant l’appui sans utiliser les capteurs du visiocasque ou d’appareils externes supplémentaires au clavier lui-même (Otte *et al.*, 2019).

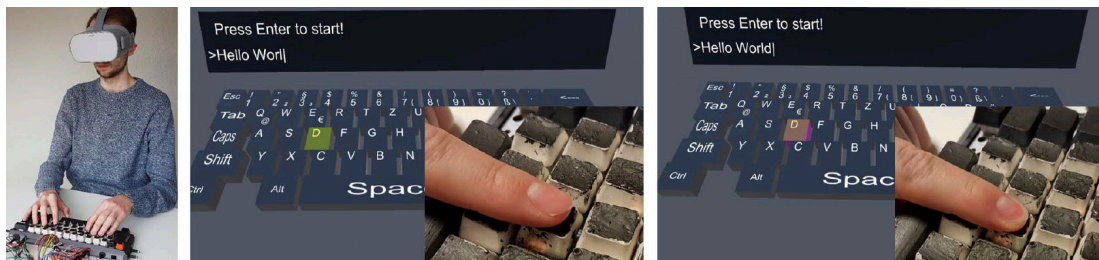


Figure 2.20: Sensibilité des touches du clavier traditionnel. Illustration extraite de (Otte *et al.*, 2019).

Les auteurs d’une récente étude se sont intéressés à la concrétisation et mobilité des configurations nécessaires pour utiliser un clavier traditionnel avec un visiocasque (dans le cadre d’expérience de réalité virtuelle), en proposant une solution avec seulement un clavier sans fil et un visiocasque à base de téléphone intelligent (Figure 2.21). Un simple marqueur (imprimé sur une feuille) est positionné juste derrière le clavier pour permettre au téléphone intelligent de suivre sa position (par la caméra) et de laisser le flux vidéo apparaître à cet endroit (pour visualiser autant les mains que le clavier réel), telle une fenêtre vers le monde réel. Ces travaux permettent d’utiliser facilement le clavier traditionnel dans différents contextes, par exemple au bureau, chez soi ou dans le train, mais l’utilisateur doit pour autant rester immobile durant la saisie de texte (Knierim *et al.*, 2020).

À cet égard, nous faisons ressortir trois interfaces notables pour avoir pleinement considéré la contrainte de mobilité du clavier traditionnel avec des visiocasques.

D’abord, dans une étude comparative, un clavier traditionnel légèrement réduit et placé sur l’avant-bras (Figure 2.22) a été exploité avec un visiocasque. L’interface



Figure 2.21: Configuration simple et mobile en utilisant un clavier traditionnel sans fil avec un visiocasque à base de téléphone intelligent. Illustration extraite de (Knierim *et al.*, 2020).

était par conséquent utilisable avec une seule main (Thomas *et al.*, 1998).



Figure 2.22: Clavier porté sur l'avant-bras. Illustration extraite de (Thomas *et al.*, 1998).

Torso Keyboard est une adaptation d'un clavier traditionnel séparé en deux parties disposées sur le torse de l'utilisateur (Figure 2.23). Les auteurs rapportent une vitesse moyenne d'écriture (en étant assis, debout ou en marchant) d'environ 54 % de leur vitesse en utilisant un clavier traditionnel d'ordinateur portable en position assise (Orlosky *et al.*, 2012).

HawKey est un support physique rétractable (Figure 2.24) permettant aux utilisateurs de se déplacer tout en disposant d'un clavier traditionnel. Les auteurs rapportent une vitesse de saisie de texte d'environ (moyenne entre les novices et experts, puis avec des textes simples et compliqués) 90 % de leur vitesse hors visiocasque pour des utilisateurs étant debout (Pham et Stuerzlinger, 2019).

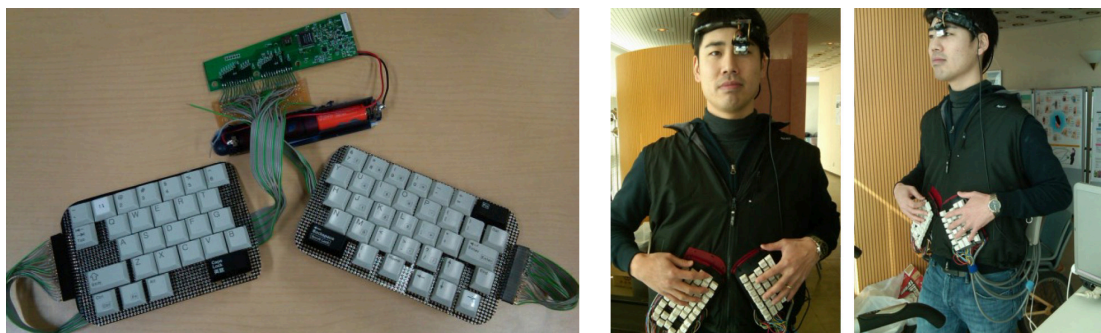


Figure 2.23: *Torso Keyboard*. Clavier porté sur le torse. Illustration extraite de (Orlosky *et al.*, 2012).

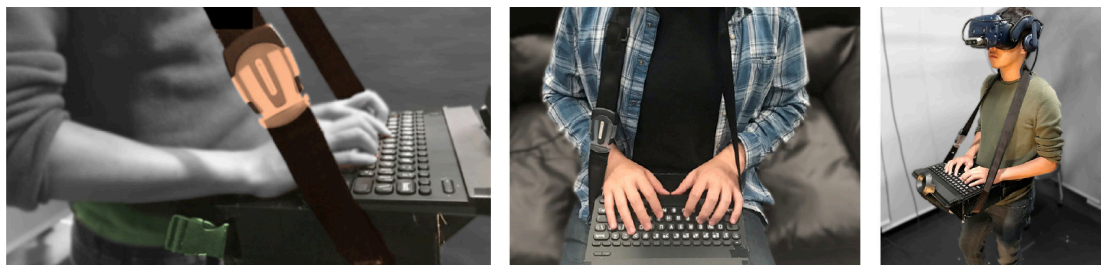


Figure 2.24: *HawKey*. Support mobile pour clavier traditionnel. Illustration extraite de (Pham et Stuerzlinger, 2019).

Les claviers traditionnels peuvent aussi subir une réduction de taille importante pour être facilement transportables jusqu'à tenir dans les mains de l'utilisateur. Cependant, cette transformation sacrifie l'utilisation de nombreux doigts, similaire aux claviers virtuels présents sur les téléphones intelligents, ces appareils sont souvent utilisés avec deux doigts (les pouces). Par ailleurs, bien que des études théoriques et empiriques ont montré que les utilisateurs de ces mini claviers pouvaient atteindre une vitesse de saisie de texte de 60 mots par minute (MacKenzie et Soukoreff, 2002; Clarkson *et al.*, 2005), aucune étude ne fut trouvée pour leur utilisation combinée avec des visiocasques.

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
Visualisation des mains en réalité virtuelle (Knierim <i>et al.</i> , 2018)	65,0
Clavier en virtualité augmentée (McGill <i>et al.</i> , 2015)	38,5
Clavier sensible au toucher (Otte <i>et al.</i> , 2019)	31,5
Configuration simple et mobile (Thomas <i>et al.</i> , 1998)	36,0
Clavier porté sur l'avant-bras (Thomas <i>et al.</i> , 1998)	15,0
<i>Torso Keyboard</i> (Orlosky <i>et al.</i> , 2012)	30,1
<i>HawKey</i> , vitesse rapportée au niveau expert (Pham et Stuerzlinger, 2019)	77,7

Tableau 2.5: Résumé de la sous-catégorie Clavier traditionnel.

2.3.2 Manette(s)

Plusieurs constructeurs proposent des manettes dédiées à l'usage des visiocasques, souvent de la forme d'un manche (bâtonnet), saisissable à une main, parfois pourvues d'un simple bouton de contrôle, mais intégrant régulièrement des capteurs inertiels permettant le suivi tridimensionnel de ces dernières.

Certains visiocasques fonctionnent de pair avec un appareil filaire externe afin d'alléger le poids et la taille du visiocasque. Ces appareils externes peuvent aussi inclure des boutons de contrôle ou des surfaces tactiles. Une étude utilisateurs fut menée pour mesurer la vitesse d'écriture en déplaçant un curseur sur un clavier virtuel avec la surface tactile d'un appareil externe connecté à un visiocasque *Moverio* (version BT-200) d'Epson (McCall *et al.*, 2015).

La manette classique habituellement dédiée aux jeux vidéo incluant notamment deux manches à balai (*joystick*) a aussi été utilisée comme interface de saisie de texte pour visiocasque. *PizzaText* est une interface avec un clavier virtuel alphabétique prenant la forme d'un disque partagé équitablement en 7 parts avec chacune 4 caractères (Figure 2.25). Le manche à balai gauche de la manette classique sert

à sélectionner la part, tandis que celui de droite sert à sélectionner et saisir le caractère. Les auteurs ont étudié plusieurs découpes (dispositions et répartitions) des caractères (Yu *et al.*, 2018).

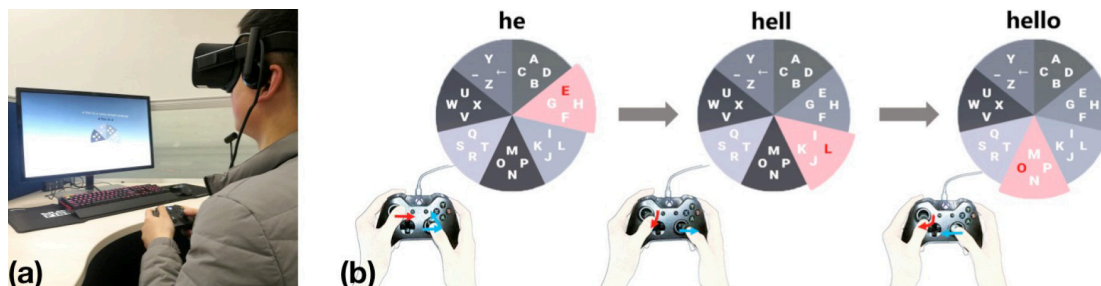


Figure 2.25: *PizzaText*. Clavier virtuel circulaire pour manette traditionnelle. Illustration extraite de (Yu *et al.*, 2018).

Une autre interface fondée sur la manette classique de jeux vidéo nécessitait qu'un seul manche à balai en le poussant dans la direction voulue (haut, bas, gauche, droite) pour changer la sélection d'un caractère à travers un clavier virtuel (QWERTY), les utilisateurs saisissaient ensuite le caractère sélectionné en appuyant sur un bouton de la manette (Boustila *et al.*, 2019).

Outre ces précédentes interfaces, la plupart des travaux exploitent une ou deux manettes (de type manche) dédiés aux visiocasques. Une première étude sur les interfaces de saisie de texte exploitant ces manettes présente l'implémentation et la comparaison de 4 types d'interactions utilisant autant le suivi tridimensionnel que la surface tactile des manettes (accessible par les pouces), toutes bénéficiaient du retour visuel d'un clavier virtuel flottant) sur le visiocasque. Uniquement la sélection et la saisie des caractères différaient, Figure 2.26, de gauche à droite :

1. *Contact*. Cette technique consiste à déplacer (en l'air) une manette proche d'une touche virtuelle pour activer cette dernière et saisir le caractère correspondant, ceci inclut des mouvements de mains horizontaux et verticaux.
2. *Marionnette*. Cette technique est une métaphore des marionnettes à fils, un

rayon vertical (tel un fil) descend virtuellement de la manette, un caractère est sélectionné lorsque le rayon entre en contact avec une touche d'un clavier virtuel placé horizontalement dessous la manette. La saisie du caractère s'opère en appuyant sur un bouton physique de la manette.

3. *Pointeur*. Cette technique est similaire à la précédente et consiste à pointer les touches du clavier virtuel (avec un rayon comme retour visuel) par l'intermédiaire de rotations des manettes et par conséquent des mains, dans ce cas, les mouvements de translation horizontaux ou verticaux ne sont plus nécessaires.
4. *Projection*. Cette technique consiste à séparer le clavier virtuel en deux parties (gauche et droite) affectées à deux manettes placées respectivement dans chacune des mains. La sélection et la saisie des caractères s'opèrent en utilisant les glissements de pouces sur la surface tactile de chacune des manettes.

L'auteur rapporte que la vitesse de saisie de texte de *Projection* est significativement plus lente que l'ensemble des autres techniques, ces dernières étant sensiblement similaires avec une légère avance pour la technique *Pointeur*. L'auteur n'a pas donné suffisamment de détails pour extraire la vitesse de saisie de texte en mots par minute (Olofsson, 2017).

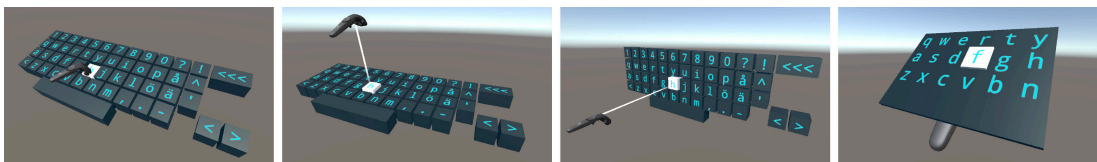


Figure 2.26: Clavier virtuel *Contact*, *Marionnette*, *Pointeur* et *Projection* utilisable avec une ou des manettes. Illustration extraite de (Olofsson, 2017).

Une autre étude consistait à comparer les interfaces *Contact*, *Pointeur* et *Projection*. Cependant, les auteurs ont proposé d'implémenter deux types de sélection

de caractères pour la technique *Projection*, soit en appuyant sur la surface tactile, avec 4 emplacements différents pour déplacer la sélection (de manière similaire à des flèches directionnelles), soit en glissant le doigt de manière continue sur la surface tactile (Speicher *et al.*, 2018).

Vitty est une interface basée sur des manettes ayant pour but d’exploiter la familiarité des claviers traditionnels, les auteurs ont adapté la technique *Pointeur* afin de sélectionner des zones de 4 caractères, ces derniers sont ensuite saisissables par des boutons dédiés et ajoutés sur les manettes (Figure 2.27). Le but est d’utiliser les mêmes doigts pour chaque caractère que ceux normalement attribués aux claviers traditionnels. Les auteurs n’ont pas donné suffisamment de détail pour extraire la vitesse d’écriture, néanmoins, ils rapportent par une étude comparative que leur solution est moins performante que la technique *Pointeur* classique (Lee et Kim, 2017).

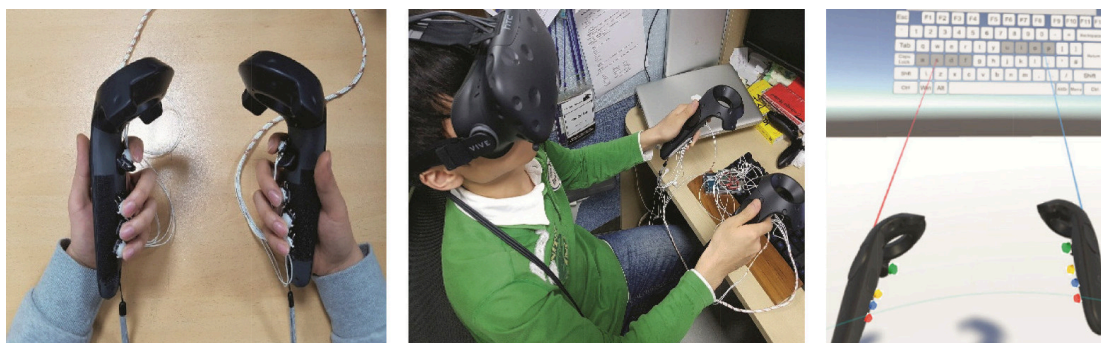


Figure 2.27: *Vitty*. Ajout de boutons physiques sur des manettes de type bâton. Illustration extraite de (Lee et Kim, 2017).

La technique *Pointeur* est aussi utilisée sans clavier virtuel, mais avec une reconnaissance automatique des caractères manuscrits (Figure 2.28), le pointeur permettant de dessiner (et saisir) les caractères un par un (Elmgren, 2017). Cette solution fut évaluée moins performante que la technique *Pointeur* classique basée sur le clavier virtuel en ce qui concerne la vitesse de saisie de texte, le taux d’erreur

et l'utilisabilité, mais fut jugée plus engageante et amusante.

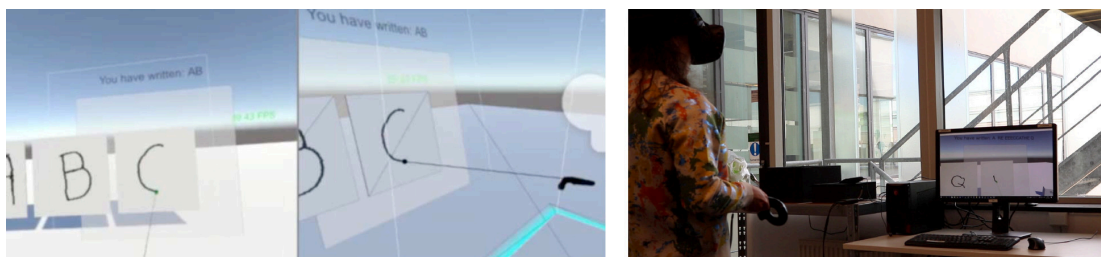


Figure 2.28: Technique du pointeur pour l'écriture manuscrite (avec une manette). Illustration extraite de (Elmgren, 2017).

Des auteurs ont combiné la technique *Pointeur* avec une technique de saisie de mots par gestuelle, sur un clavier virtuel cubique au format 3x3x3 (Figure 2.29). Les mouvements du cube sont synchronisés avec ceux de la manette, l'utilisateur fixe le cube en appuyant sur un bouton de la manette, puis déplace le pointeur sur chacune des touches composant le mot qui sera saisi une fois le bouton relâché (Yanagihara et Shizuki, 2018).

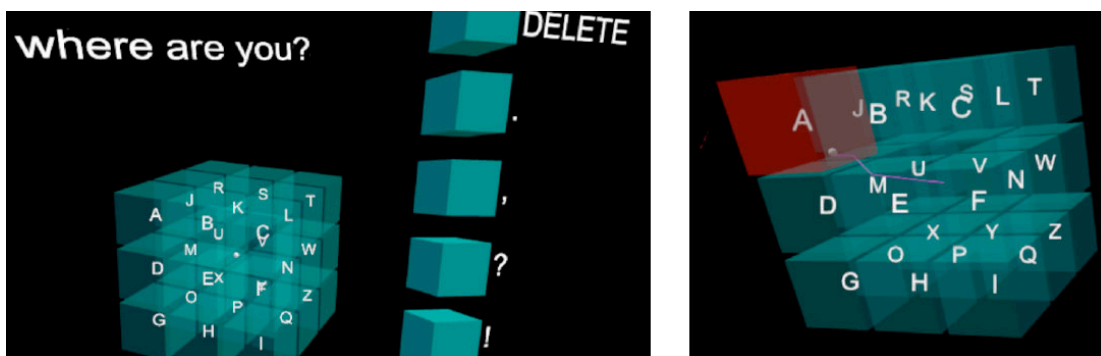


Figure 2.29: Clavier cubique virtuel utilisable avec des manettes. Illustration extraite de (Yanagihara et Shizuki, 2018).

La technique *Pointeur* avec la saisie de mots par gestuelle fut aussi implémentée et explorée sur un clavier virtuel standard (QWERTY) avec une paire de manettes (Figure 2.30). Les auteurs rapportent, après avoir mené une étude préliminaire,

que la vitesse de saisie de texte de leur solution est légèrement plus élevée que celle rapportée pour la technique *Pointeur* originale, sans saisie de mots par gestuelle (Chen *et al.*, 2019).



Figure 2.30: Technique de *Pointeur* par manette avec la saisie de mots par gestuelle. Illustration extraite de (Chen *et al.*, 2019).

Batterie est une technique se basant sur la métaphore du joueur de batterie (l'instrument de musique), l'utilisateur manipule une paire de manettes (dédiées aux visiocasques) de la même manière qu'un musicien pour tapoter virtuellement (ainsi les mouvements suffisent à sélectionner et saisir un caractère) sur un clavier virtuel (Figure 2.31, B). Des auteurs ont comparé cette interface avec les techniques *Pointeur*, *Projection* et rapportent une vitesse plus rapide pour *Batterie* de respectivement 26,2 % et 106,6 % (Boletsis et Kongsvik, 2019).

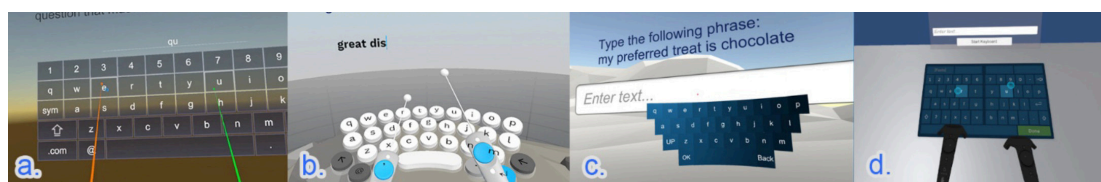


Figure 2.31: Clavier virtuel basé sur la métaphore de la *batterie* (B). Illustration extraite de (Boletsis et Kongsvik, 2019).

HiPad est une interface exploitant un clavier virtuel alphabétique circulaire avec la surface tactile d'une seule manette (Figure 2.32). Le pouce accède à la surface

tactile pour diriger un curseur vers l'un des six groupes de lettres, un appui (pression forte) sur la surface tactile permet de saisir l'une des lettres, la séquence des groupes de lettres saisies permet de suggérer des mots candidats, saisissable avec de simples appuis centraux et l'équivalent d'un glissement vers le bas pour changer de sélection. Les auteurs ont implémenté deux retours visuels de leur disposition des caractères, soit flottants devant l'utilisateur, soit directement intégrés sur la représentation virtuelle de la manette, à l'emplacement de la surface tactile, dans ce cas les mots suggérés sont positionnés en dessous de la zone d'édition du texte (Jiang et Weng, 2020).

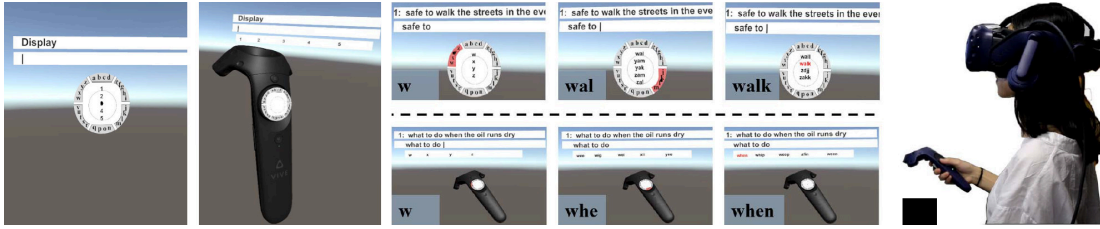


Figure 2.32: *HiPad*, clavier virtuel circulaire avec une seule manette. Illustration extraite de (Jiang et Weng, 2020).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
Manette filaire avec surface tactile (McCall <i>et al.</i> , 2015)	5,6
<i>PizzaText</i> (Yu <i>et al.</i> , 2018)	15,9
Manette et clavier virtuel standard (Boustila <i>et al.</i> , 2019)	9,0
<i>Contact</i> , <i>Marionnette</i> , <i>Pointeur</i> , <i>Projection</i> (Olofsson, 2017)	-
<i>Contact</i> ; <i>Pointeur</i> ; <i>Projection</i> directionnelle ; et continue (Speicher <i>et al.</i> , 2018)	12,7 ; 15,4 ; 5,3 ; 8,4
<i>Vitty</i> (Lee et Kim, 2017)	-
<i>Pointeur</i> avec reconnaissance des caractères (Elmgren, 2017)	4,1
Saisie de mots par gestuelle sur clavier virtuel cubique (Yanagihara et Shizuki, 2018)	21,6
Saisie de mots par gestuelle sur clavier virtuel standard (Chen <i>et al.</i> , 2019)	16,4
<i>Batterie</i> (Boletsis et Kongsvik, 2019)	21,0
<i>HiPad</i> (Jiang et Weng, 2020)	13,6

Tableau 2.6: Résumé de la sous-catégorie Manette(s).

2.3.3 Téléphone intelligent

Les téléphones intelligents ont été largement démocratisés et représentent maintenant des appareils familiers pour de nombreux utilisateurs, offrant des techniques de saisie de texte de plus en plus performantes.

HoVR-Type est une interface profitant d'une caractéristique de certains téléphones intelligents pouvant détecter la présence des doigts flottants au-dessus de l'écran tactile. Les auteurs ont utilisé cette technologie pour présenter un clavier virtuel pour visiocasque similaire à celui du téléphone intelligent incluant un retour visuel lorsqu'un doigt se présente au-dessus de l'écran du téléphone (Figure 2.33). Ils ont étudié la saisie des caractères avec une main, soit lorsque le doigt touche l'écran ou lorsqu'il le relâche (permettant ainsi de rectifier la sélection des caractères après appui). Ils rapportent une vitesse similaire entre les deux techniques et ont mentionné le stress occasionné aux participants à devoir passer son doigt suffisamment proche de l'écran sans avoir le toucher (Kim et Kim, 2016).

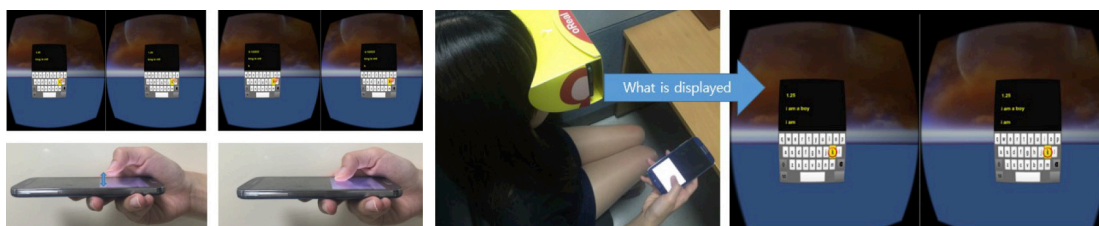


Figure 2.33: *HoVR-Type*. Utilisation de la reconnaissance des doigts flottants sur téléphones intelligents. Illustration extraite de (Kim et Kim, 2016).

BlindType est une interface se basant sur la mémoire musculaire du pouce et sur différentes données empiriques d'appuis sur un écran tactile de téléphone pour définir et optimiser la taille et l'emplacement idéal des touches du clavier virtuel lorsqu'il est hors de portée visuelle (Figure 2.34). Les auteurs ont inclus la suggestion des mots (Lu *et al.*, 2017).

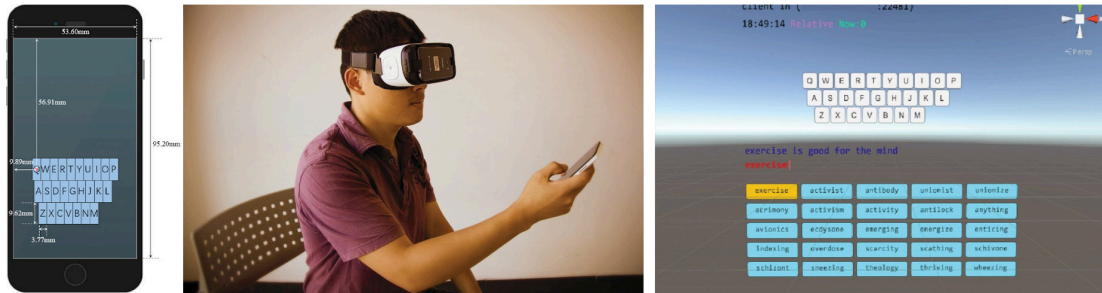


Figure 2.34: *BlindType*. Optimisation de la disposition du clavier virtuel sur téléphone intelligent pour une utilisation avec visiocasque. Illustration extraite de (Lu *et al.*, 2017).

SaaC est une approche utilisant l'écran tactile du téléphone horizontalement avec la technique de sélection et saisie des caractères en relâchant l'appui mais en utilisant les deux mains, plus précisément les deux pouces (Boustila *et al.*, 2019).

Des auteurs ont exploité la saisie de mots par gestuelle des doigts sur l'écran tactile d'un téléphone intelligent (Figure 2.35). Pour sélectionner correctement le premier caractère, ils ont utilisé un téléphone intelligent ayant un écran tactile sensible à la pression. Ils ont défini un seuil de force d'appui de 50 % pour séparer un appui léger permettant de placer le doigt (avec un retour visuel) sur le caractère souhaité sans le saisir et un appui fort pour commencer la gestuelle (Chen *et al.*, 2019).



Figure 2.35: Utilisation de la sensibilité à la force d'appui sur l'écran tactile d'un téléphone intelligent avec la technique de saisie de mots par gestuelle. Illustration extraite de (Chen *et al.*, 2019).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>HoVR-Type</i> , en relâchant le doigt de l'écran (Kim et Kim, 2016)	9,2
<i>BlindType</i> , avec suggestion de mots (Lu <i>et al.</i> , 2017)	20,8
Relâchement tactile sur clavier virtuel (Boustila <i>et al.</i> , 2019)	12,1
Saisie de mots par gestuelle sensible à la pression (Chen <i>et al.</i> , 2019)	9,6

Tableau 2.7: Résumé de la sous-catégorie Téléphone intelligent.

2.3.4 Gant(s)

Les appareils de type gant(s) représentent les dispositifs qui recouvrent l'essentiel de la peau d'une ou des mains.

Pinch Keyboard est une interface utilisant deux gants comprenant une centrale inertielle (avec 6 degrés de liberté) et des points de contact placés au bout des doigts, activables lorsque ces derniers se rejoignent par pincement (Figure 2.36). Chaque contact entre le pouce et un autre doigt de la même main permet de saisir une lettre, avec des combinaisons particulières pour les caractères spéciaux, par exemple en joignant les deux pouces pour saisir un espace. Pour des raisons de familiarité, la disposition des lettres reprend celle du QWERTY. Ainsi, lorsque le pouce de la main gauche est en contact avec le petit doigt, la lettre «Q» est saisie, et le «W» avec l'annulaire (la paume de la main pointe vers le bas). Les lettres intérieures (tel que «T» ou «Y») sont saisies en joignant le pouce avec à la fois le majeur et l'index, ou en faisant pivoter la main. La sélection de la ligne (de lettre) s'effectue en rapprochant ou éloignant les mains du corps (Bowman *et al.*, 2001). Cette interface fut utilisée dans deux études comparatives distinctes concernant l'usage des visiocasques (Bowman *et al.*, 2002; González *et al.*, 2009).

KITTY est une interface similaire au *Pinch Keyboard* mais la sélection de la ligne de lettres et des lettres intérieures s'opère grâce à la multiplication des points de



Figure 2.36: *Pinch Keyboard*. Paire de gants avec points de contact placés au bout des doigts. Illustration extraite de (Bowman *et al.*, 2002).

contact notamment sur les pouces (Figure 2.37), par exemple le bout du pouce correspond à la ligne de lettres positionnées en haut (c'est-à-dire «QWER») tandis qu'un point de contact plus bas vers l'articulation correspond à «ASDF» ou encore «ZXCV» (Kuester *et al.*, 2005).



Figure 2.37: *KITTY*. Paire de gants avec points de contact placés le long des doigts. Illustration extraite de (Kuester *et al.*, 2005).

L'usage de gestuelles discrètes pour être acceptées dans un contexte social fut étudié (Hsieh *et al.*, 2016). Les auteurs ont conçu un gant pourvu d'une centrale inertielle pour connaître l'orientation de la main ainsi que des capteurs flexibles associés au pouce, à l'index et au majeur afin de connaître l'inclinaison de ces derniers (Figure 2.38). Ils ont utilisé le gant pour saisir du texte avec un visiocasque affichant un clavier virtuel standard (QWERTY). Après une calibration et syn-

chronisation de l'appareil avec un visiocasque, le mouvement de la main permet de pointer et déplacer horizontalement et verticalement des groupes de 3 caractères, l'utilisateur doit ensuite plier un des doigts pour saisir l'un des caractères correspondants (par exemple avec la main droite, le pouce pour le caractère à gauche). Le gant inclut aussi un retour haptique par vibration lorsqu'un caractère est saisi.

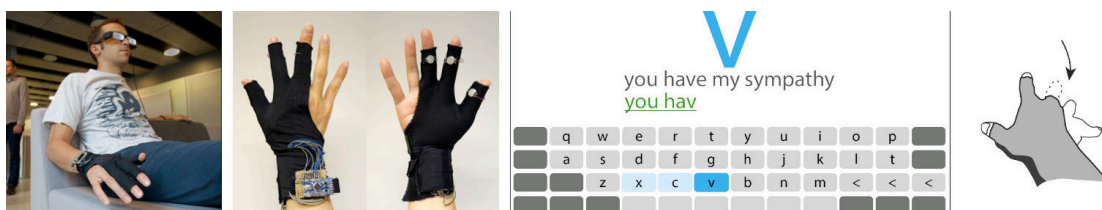


Figure 2.38: Gant dédié aux gestes discrets. Illustration extraite de (Hsieh *et al.*, 2016).

D'autres auteurs ont étudié les vibrations lors d'appuis sur des claviers traditionnels afin de simuler le plus fidèlement leur retour haptique dans un environnement virtuel (Wu *et al.*, 2017). Ils ont créé une paire de gants incluant notamment des capteurs infrarouges pour suivre le déplacement des mains et des micro-haut-parleurs placés sur le bout de chaque doigt pour retranscrire les vibrations (Figure 2.39). Les auteurs n'ont pas rapporté de vitesse de saisie de texte.

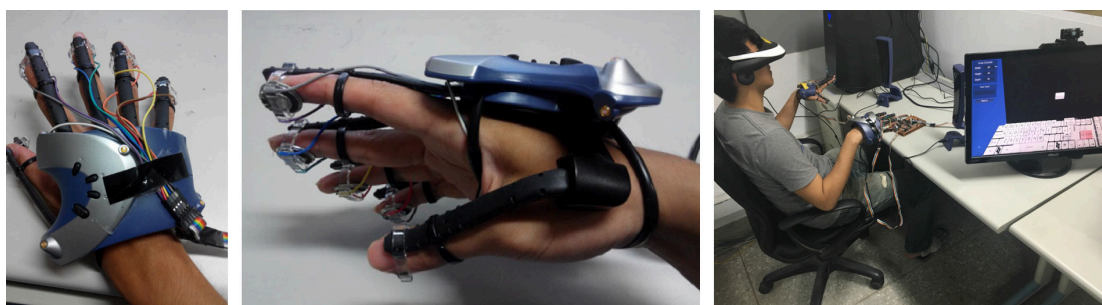


Figure 2.39: Paire de gants avec retour haptique réaliste. Illustration extraite de (Wu *et al.*, 2017).

DigiTouch est une interface basée sur une paire de gants avec des zones tactiles le long des doigts (index, majeur, annulaire et auriculaire) accessible au toucher

par le pouce, permettant notamment de reconnaître un simple tapotement, un glissement, un appui fort et des appuis simultanés (Figure 2.40). Ils ont implémenté une interface de saisie de texte en affectant des caractères aux zones des doigts en se basant sur la disposition standard QWERTY. L'utilisateur peut glisser son pouce le long d'un doigt pour sélectionner un caractère (avec un retour visuel sur le visiocasque), puis effectuer un appui fort pour le saisir (Whitmire *et al.*, 2017).

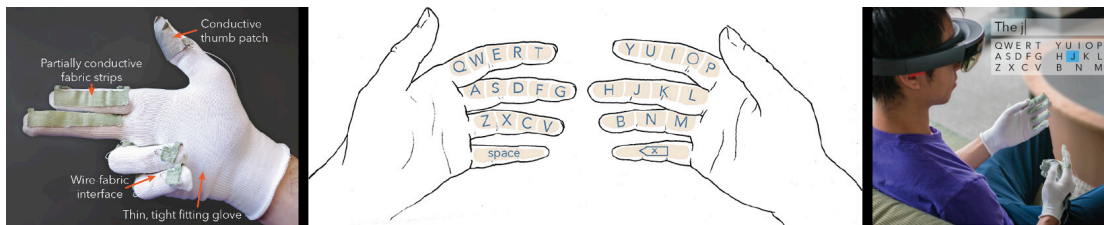


Figure 2.40: *DigiTouch*. Paire de gants avec des zones tactiles. Illustration extraite de (Whitmire *et al.*, 2017).

D'autres auteurs ont créé un gant avec 9 points contacts (placé sur l'index, le majeur et l'annulaire) permettant de reconnaître différents niveaux de force d'appui. Ils ont implémenté une interface de saisie de texte en affectant 3 caractères par points de contact différencié suivant la force d'appui du pouce (Figure 2.41). Les auteurs ont affecté une disposition des caractères personnalisée et basée sur 4 critères : l'association des caractères par paire (suivant leur fréquence de succession dans la langue anglaise), la familiarité avec la disposition QWERTY, la gestion de la force et le confort lié à la portée du pouce (Lee *et al.*, 2019).

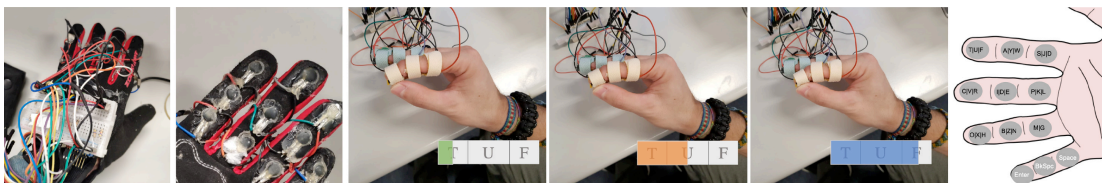


Figure 2.41: Gant sensible à la force d'appui. Illustration extraite de (Lee *et al.*, 2019).

HiFinger est une interface basée sur un gant avec 8 points de contact placés sur seulement deux doigts : index et majeur (Figure 2.42). Ils ont implémenté une interface de saisie de texte avec l’aide d’un clavier virtuel découpé en 6 groupes de 6 caractères (disposés par ordre alphabétique) affiché sur le visiocasque. La saisie de caractère s’opère en deux temps, un appui pour sélectionner un groupe et un second appui pour saisir le caractère (Jiang *et al.*, 2019).

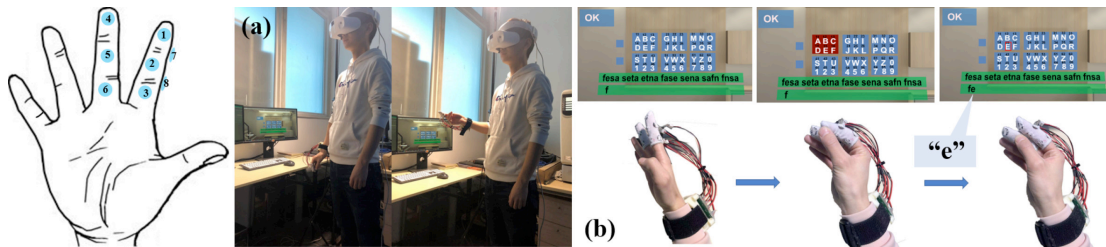


Figure 2.42: *HiFinger*. Gant avec points de contact sur deux doigts. Illustration extraite de (Jiang *et al.*, 2019).

PinchType est une interface de saisie de texte nécessitant seulement de simples appuis du pouce avec les autres doigts de la main, ces derniers sont dépourvus de points de contact précis et regroupent un ensemble de caractères défini suivant leur affectation habituelle avec la disposition QWERTY (Figure 2.43). Le choix du caractère par groupement est basé sur la séquence des appuis (en corrélation avec un dictionnaire) et l’interface suggère une liste de mots candidats sélectionnables en laissant appuyer les deux index puis en déplaçant verticalement la main droite. Les auteurs ont implémenté leur interface avec une caméra externe et des gants pourvus de capteurs optiques dédiés à la capture de mouvements (Fashimpaur *et al.*, 2020).



Figure 2.43: *PinchType*. Groupements de caractères par doigt basés sur la disposition QWERTY avec suggestion de mots. Illustration extraite de (Fashimpaur *et al.*, 2020).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>Pinch Keyboard</i> (Bowman <i>et al.</i> , 2002)	6,3
<i>KITTY</i> (Kuester <i>et al.</i> , 2005)	2,6
Gant pour gestuelle discrète (Hsieh <i>et al.</i> , 2016)	5,4
Gant avec retour haptique réaliste (Wu <i>et al.</i> , 2017)	-
<i>DigiTouch</i> (Whitmire <i>et al.</i> , 2017)	13,0
Gant sensible à la force d'appui (Lee <i>et al.</i> , 2019)	6,5
<i>HiFinger</i> (Jiang <i>et al.</i> , 2019)	9,3
<i>PinchType</i> (Fashimpaur <i>et al.</i> , 2020)	12,5

Tableau 2.8: Résumé de la sous-catégorie Gant(s).

2.3.5 Montre et bracelet

Nous rassemblons dans la catégorie montre et bracelet tout appareil se portant autour du poignet, bien souvent qualifié de connecté (et dans notre cas, d'une manière ou d'une autre, à un visiocasque).

DigiTap est une interface utilisant un bracelet connecté intégrant un accéléromètre et une caméra afin de détecter 12 emplacements de tapotement du pouce sur le reste de la main, ceci inclut les 8 points d'articulation et les 4 bouts des doigts (Figure 2.44). L'accéléromètre permet de détecter l'appui du pouce et enclenche la capture de l'image par la caméra pour détecter l'emplacement en traitant l'image (avec un taux de réussite de 94 %). Les auteurs ont illustré une utilisation pour

visiocasque de leur solution en tant que clavier à appui multiple, mais ils n'ont pas mené d'étude utilisateurs pour cet usage (Prätorius *et al.*, 2014).

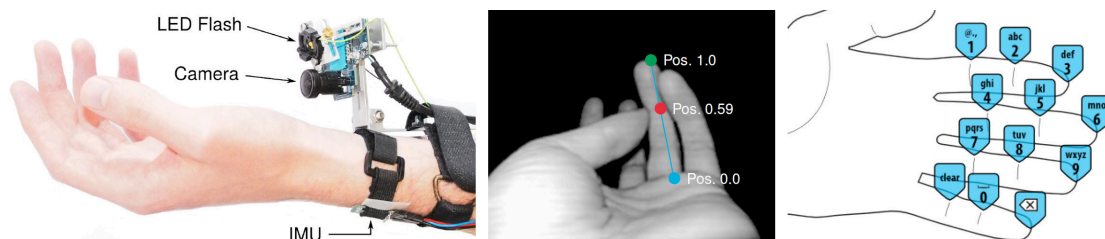


Figure 2.44: *DigiTap*. Caméra et centrale inertielle placées sur un bracelet. Illustration extraite de (Prätorius *et al.*, 2014).

PalmType est une approche divisant la surface intérieure de la main en 28 zones (Figure 2.45), chacune représente un caractère de l'alphabet ainsi que l'espace et correction. Les auteurs ont implémenté leur solution par l'intermédiaire d'un bracelet composé d'une ligne de 15 capteurs infrarouges de proximité dirigés vers la paume de la main pour détecter la présence et l'emplacement d'un doigt (de la main opposée) ou d'un autre objet, par exemple un stylet (Wang *et al.*, 2015a). Les mêmes auteurs ont implémenté *EyeWrist*, un bracelet similaire incorporant une microcaméra et un générateur de lasers infrarouges, afin de proposer une autre approche basée sur la paume de la main, *PalmGesture*. Cette technique consiste à reconnaître les déplacements d'un doigt puis de les utiliser avec un algorithme de reconnaissance automatique des caractères. Les auteurs n'ont pas mesuré la vitesse de saisie de texte, mais rapporte un taux de reconnaissance des caractères supérieur à 90 % (Wang *et al.*, 2015b).

Kinemic Wave est une interface utilisant les capteurs inertiels (de type accéléromètre et gyroscope) d'un bracelet connecté pour détecter les mouvements de la main en l'air jusqu'à pouvoir reconnaître la saisie de mots et phrases. Leur solution est basée sur leur précédente recherche utilisant un prototype intégrant les mêmes composants, mais plus proche du gant (Ammar *et al.*, 2012). Les auteurs

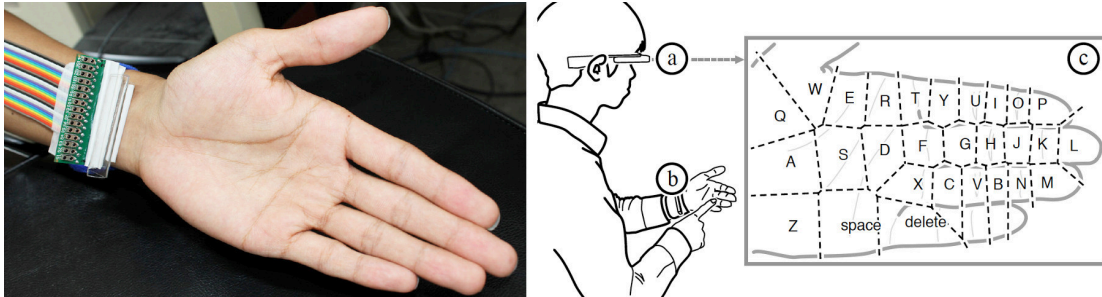


Figure 2.45: *PalmType*. Clavier disposé sur la paume de main. Illustration extraite de (Wang et al., 2015a).

rapportent des critères de performances plus couramment liés aux reconnaissances des mots pour les interfaces de reconnaissance vocale, mais pas de performances standards (telles que la vitesse et le taux d'erreur) aux interfaces de saisie de texte (Ammma et al., 2016).

Une montre connectée fut utilisée pour implémenter deux interfaces de saisie de texte en deux temps (actions). La première reprend la technique du *SwipeBoard* présentée auparavant en sélectionnant d'abord une zone de 9 caractères, puis le caractère visé par des gestes de glissement sur la surface tactile de la montre (Figure 2.46). La deuxième technique, *HoldBoard*, est équivalente, mais implique une personnalisation de la montre (l'ajout d'une nouvelle surface tactile sur le côté) et l'utilisation combinée de deux doigts : le pouce sélectionne la zone des 9 caractères sur la nouvelle surface afin qu'un autre doigt effectue le deuxième geste habituel de glissement pour saisir le caractère (Ahn et al., 2017).

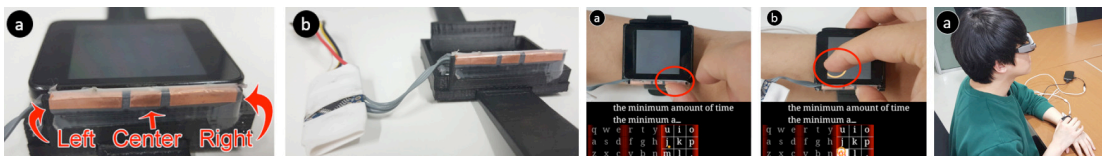


Figure 2.46: *HoldBoard*. Montre connectée avec surface tactile périphérique. Illustration extraite de (Ahn et al., 2017).

Par quantité insuffisante de travaux similaires, nous catégorisons l'interface *TEXTile* comme bracelet, car du textile sensible au toucher est placé sur l'avant-bras de l'utilisateur (Figure 2.47). Les auteurs ont implémenté une interface de saisie de texte fondée sur la succession de combinaisons de toucher des doigts pour sélectionner des caractères disposés (virtuellement sur le visiocasque) selon le standard QWERTY (Belkacem *et al.*, 2019).

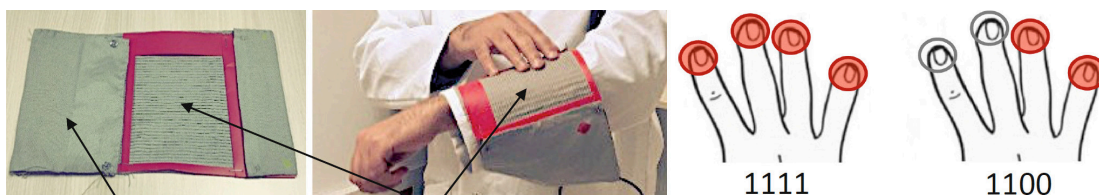


Figure 2.47: *TEXTile*. Surface tactile (textile) placée sur l'avant-bras. Illustration extraite de (Belkacem *et al.*, 2019).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>DigiTap</i> (Prätorius <i>et al.</i> , 2014)	-
<i>PalmType</i> (Wang <i>et al.</i> , 2015a)	4,6
<i>PalmGesture</i> avec l'implémentation d' <i>EyeWrist</i> (Wang <i>et al.</i> , 2015b)	-
<i>Kinemic Wave</i> (Ammma <i>et al.</i> , 2016)	-
<i>HoldBoard</i> , montre connectée personnalisée (Ahn <i>et al.</i> , 2017)	10,2
<i>TEXTile</i> , sur l'avant bras (Belkacem <i>et al.</i> , 2019)	8,1

Tableau 2.9: Résumé de la sous-catégorie Montre et bracelet.

2.3.6 Anneau(x)

Nous considérons les anneaux, tout appareil circulaire se portant sur un ou plusieurs doigts, laissant à l'air libre la grande majorité de la main (et de ses doigts).

FingeRing est le premier concept d'interface de saisie de texte par l'utilisation d'anneaux. La solution comporte 5 anneaux pour chacun des doigts d'une main

(Figure 2.48) équipés d'accéléromètres permettant de détecter les appuis (choc) des doigts sur une autre surface (quelles soit dure ou souple). Les auteurs ont utilisé la technique des claviers accords (décrite dans la section suivante, 2.3.7), dans leur cas, l'appui simultané de plusieurs doigts suivant différentes combinaisons distinctes permettait de saisir des caractères (Fukumoto et Suenaga, 1994).

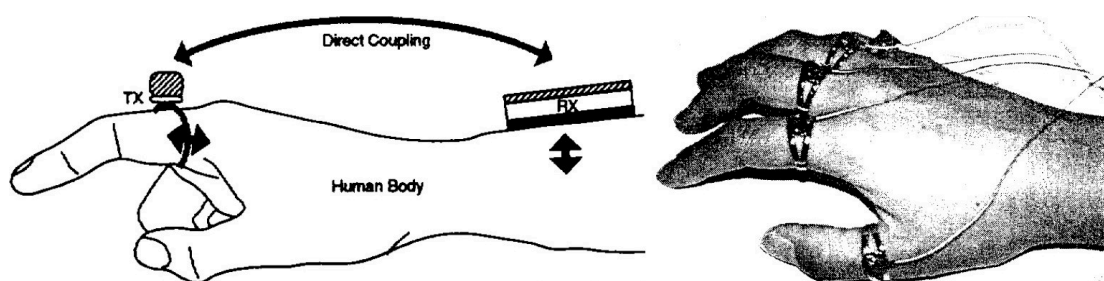


Figure 2.48: *FingerRing*. Ensemble de cinq anneaux équipés d'accéléromètre. Illustration extraite de (Fukumoto et Suenaga, 1994; Fukumoto et Tonomura, 1997).

ThumbText est une interface utilisant un seul anneau composé d'une surface tactile miniature (Figure 2.49). La surface tactile reste suffisamment grande pour détecter des gestuelles (de type glissement multidirectionnel) effectuées par le pouce de l'utilisateur. Les auteurs ont implémenté une interface de saisie de texte en deux temps, sur la base d'une grille de format 2x3. Les cellules de la grille sont d'abord composées d'un groupement de 6 caractères comprenant à nouveau une grille de même format avec chacun des caractères (soit un total de 36 caractères, dont une cellule dédiée à la correction). Les sélections s'effectuent en appuyant sur la zone correspondante de la surface tactile et en effectuant un glissement vers la cellule désirée si la zone d'appui n'est pas souhaitée (Kim *et al.*, 2018a).

Toujours en utilisant un seul anneau, *RotoSwype* est une interface implémentant la saisie de mots par gestuelle (Figure 2.50). L'anneau intègre un bouton physique et une centrale à inertie (gyroscope et accéléromètre) afin d'extraire les mouvements d'inclinaison permettant notamment de déplacer et tracer un chemin à travers les

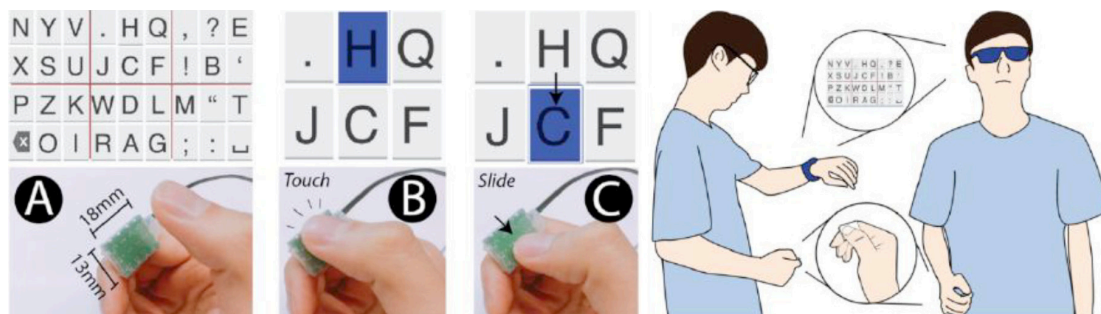


Figure 2.49: *ThumbText*. Anneau équipé d'une surface tactile. Illustration extraite de (Kim *et al.*, 2018a).

caractères d'un clavier virtuel pour former un mot complet (Gupta *et al.*, 2019).

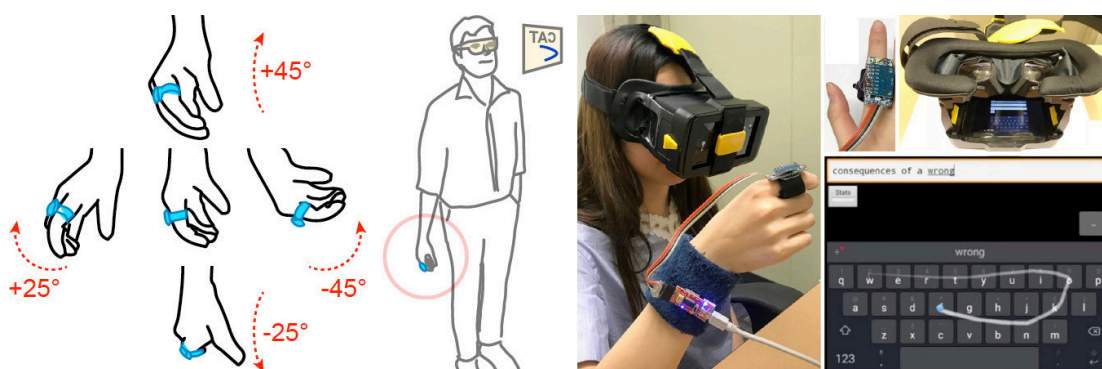


Figure 2.50: *RotoSwype*. Anneau équipé d'une centrale inertiel et d'un bouton pour saisir des mots par gestuelle. Illustration extraite de (Gupta *et al.*, 2019).

Par quantité insuffisante de travaux similaires, nous catégorisons comme anneaux l'interface *TipText*, une fausse peau portée uniquement sur l'index (Figure 2.51), intégrant une surface sensible au toucher permettant de reconnaître des micro gestes opérés sur le bout du doigt. L'interface inclut des suggestions de mots et regroupe les caractères dans 6 zones distinctes basées sur la disposition QWERTY (Xu *et al.*, 2019). Les auteurs ont aussi adapté leur disposition des caractères pour l'utiliser avec les index de chaque main (Xu *et al.*, 2020).

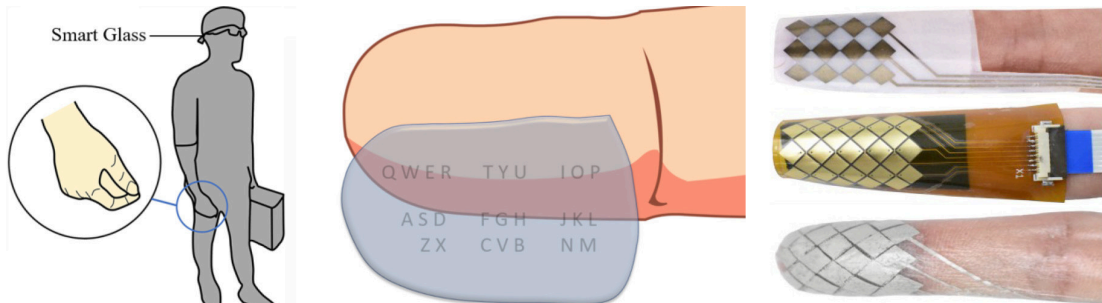


Figure 2.51: *TipText*. Peau interactive sensible au toucher placée sur l'index. Illustration extraite de (Xu *et al.*, 2019).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>FingeRing</i> , vitesse rapportée pour une étude préliminaire (Fukumoto et Suenaga, 1994)	-
<i>ThumbText</i> (Kim <i>et al.</i> , 2018a)	11,4
<i>RotoSwype</i> , saisie de mots par gestuelle (Gupta <i>et al.</i> , 2019)	14,0
<i>TipText</i> (Xu <i>et al.</i> , 2019) ; <i>BiTipText</i> , à deux mains (Xu <i>et al.</i> , 2020)	13,3 ; 23,4

Tableau 2.10: Résumé de la sous-catégorie Anneau(x).

2.3.7 Clavier accord

La technique des claviers accords (*chord keyboard*) consiste à devoir appuyer simultanément sur plusieurs touches pour saisir un caractère (Noyes, 1983a). Le nombre de combinaison possible est équivalent à $(2^n - 1)$ avec n le nombre de touches disponible sur le clavier (par exemple, il y a 1023 possibilités avec 10 touches). Les claviers accords peuvent prendre différentes formes, nous catégorisons ici seulement ceux qui ne représentent pas déjà un autre type d'appareil.

Les claviers accords ont été utilisés avec des visiocasques dans plusieurs études comparatives. D'abord avec un clavier accord mobile (*Kordic Keypad*) utilisable à une main et comprenant 5 touches, soit 31 combinaisons (Figure 2.52, gauche). Les caractères sont saisis après le relâchement des touches (Thomas *et al.*, 1998). Ensuite, deux autres études comparatives ont exploité le même clavier accord

mobile avec des visiocasques, le *Twiddler*, disposant de 12 touches et utilisable avec une seule main (Figure 2.52, droite). Dans les deux études, les auteurs ont rapporté de faibles performances en termes de vitesse de saisie de texte, un taux d'erreur important, ainsi que de faibles appréciations par les participants (Bowman *et al.*, 2002; González *et al.*, 2009).

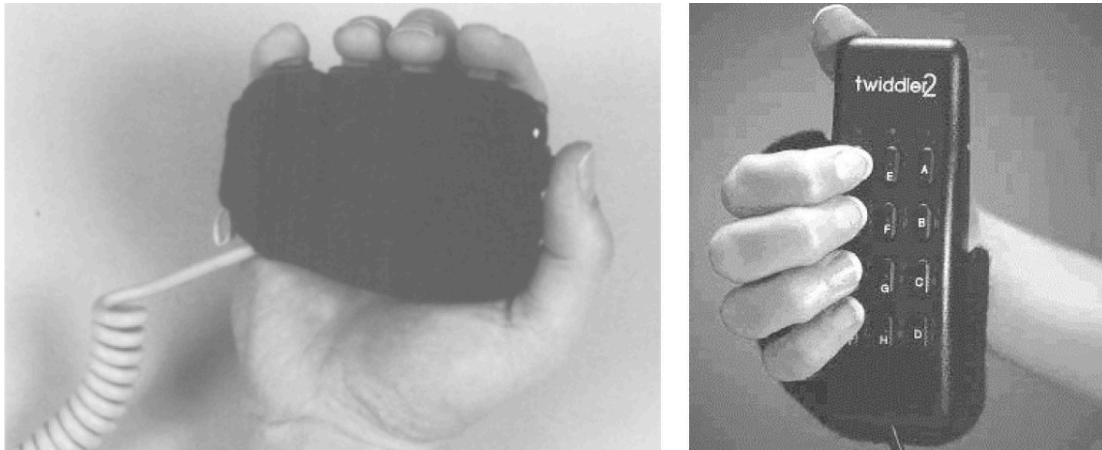


Figure 2.52: Deux claviers accords : *Kordic Keypad* (gauche) et *Twiddler* (droite). Illustration extraite de (Thomas *et al.*, 1998; Bowman *et al.*, 2002).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>Kordic Keypad</i> (Thomas <i>et al.</i> , 1998)	5,0
<i>Twiddler</i> , utilisé en réalité virtuelle (Bowman <i>et al.</i> , 2002)	4,2
<i>Twiddler</i> , utilisé en réalité virtuelle (González <i>et al.</i> , 2009)	3,0

Tableau 2.11: Résumé de la sous-catégorie Clavier accord.

2.3.8 Stylet

Nous considérons stylet tout appareil s'apparentant au stylo ou crayon et permettant de contrôler un outil informatique.

Virtual Notepad est une interface exploitant le stylet et une tablette pour saisir du texte avec un visiocasque dans un contexte médical, notamment pour prendre des notes et saisir une écriture manuscrite retranscrite virtuellement (Figure 2.53). Les auteurs ont intégré une reconnaissance des caractères, mais uniquement pour commander leur outil, par exemple en saisissant « A » pour ajouter une nouvelle note ou « N » pour accéder à la page suivante (Poupyrev *et al.*, 1998).

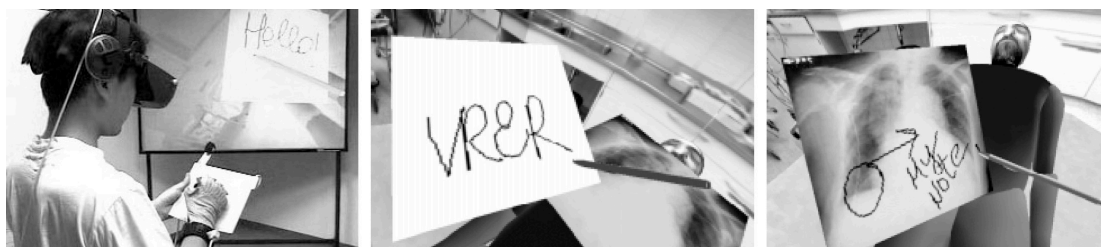


Figure 2.53: *Virtual Notepad*. Illustration extraite de (Poupyrev *et al.*, 1998).

Lors d’une étude comparative, d’autres auteurs ont utilisé un stylet, mais avec une disposition de clavier standard (QWERTY) virtuellement présent sur la surface d’une tablette (Figure 2.54). Les utilisateurs pouvaient saisir du texte en pressant le stylet sur les touches virtuelles du clavier. Les auteurs ont rapporté une fatigue de la main importante parmi les participants (Bowman *et al.*, 2002).



Figure 2.54: Utilisation du stylet et d’une tablette avec un clavier virtuel. Illustration extraite de (Bowman *et al.*, 2002).

Toujours pour une étude comparative, le stylet et un support de type tablette ont été utilisés avec trois implémentations différentes d’interfaces de saisie de texte (Figure 2.55) :

1. Avec un clavier virtuel standard (QWERTY), similaire à la technique précédente, en appuyant sur chacune des touches avec le stylet.
2. Avec un clavier virtuel circulaire, l’utilisateur cible et appuie sur un caractère pour le sélectionner, puis effectue soit un glissement vers l’intérieur du cercle pour saisir le caractère ou vers l’extérieur pour annuler la sélection.
3. Avec une reconnaissance des caractères individuels, l’utilisateur peut saisir les caractères en les dessinant un par un.

Les auteurs ont mentionné que leur algorithme de reconnaissance des caractères n’était pas suffisamment efficace, avec des conséquences sur la vitesse de saisie de texte (González *et al.*, 2009).

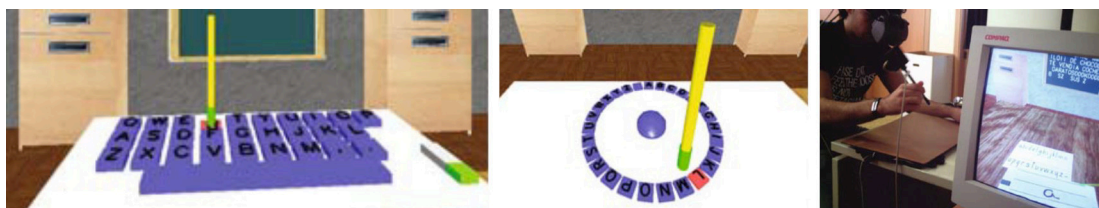


Figure 2.55: Trois interfaces utilisant le stylet et une tablette : clavier virtuel standard, clavier virtuel circulaire et reconnaissance manuscrite. Illustration extraite de (González *et al.*, 2009).

Nom (ou description) de l’interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>Virtual Notepad</i> (Poupyrev <i>et al.</i> , 1998)	
Clavier virtuel standard (CVS) (Bowman <i>et al.</i> , 2002)	9,9
CVS ; circulaire ; reconnaissance des caractères (González <i>et al.</i> , 2009)	7,2 ; 4,2 ; 2,6

Tableau 2.12: Résumé de la sous-catégorie Stylet.

2.4 Analyse et résumé de l'état de l'art

Le tableau 2.13 résume les caractéristiques positives et négatives des différentes sous-catégories suite à l'analyse des résultats (tant quantitatifs que qualitatifs) des solutions présentées. Nous rapportons les écarts de valeurs de la vitesse de saisie de texte car ce critère est le seul quasi universel et standardisé pour les études d'interfaces de saisie de texte. Néanmoins, nous tenons à mettre en évidence deux points importants concernant la vitesse :

1. Ce critère n'est pas l'unique moyen pour mesurer les performances d'une interface de saisie de texte, le taux d'erreur est régulièrement rapporté (mais moins standardisé avec différentes formules de calcul), de même que l'utilisabilité et la charge de travail.
2. Malgré la standardisation de ce critère, il faut prendre des précautions en comparant les valeurs absolues rapportées, car indépendamment des interfaces, les méthodologies des études utilisateurs sont relativement différentes (par exemple la langue, la difficulté et la quantité de texte à retranscrire, le niveau d'expertise initial et final des participants, le nombre et la durée des sessions, de l'entraînement ou encore la politique de gestion des erreurs et corrections) avec des conséquences significatives sur la vitesse de saisie de texte. Pour cette même raison, avec des effets encore plus accentués, nous n'avons pas inclus de comparaison des autres critères (moins standardisés ou subjectifs) entre les différentes études.

Catégorie	Vitesse (mpm)	Caractéristiques	
		Positive	Négative
Interne, gestuelle			
Main(s)	6,0 - 17,8		Retour tactile, acceptation sociale, fatigue (bras et mains), retour visuel
Tête	2,1 - 24,7	Mains libre	Fatigue (cou, nuque et cognitif), acceptation sociale, retour visuel
Regard	9,4 - 11,0	Mains libre	Calibration, fiabilité, précision, maux (tête), retour visuel
Tactile	8,7 - 10,0		Acceptation sociale, fatigue (bras)
Externe, appareil			
Clavier traditionnel	15,0 - 77,7	Familiarité, Rétroaction haptique	Mobilité
Manette(s)	4,1 - 21,6		Main(s) occupée(s)
Téléphone intelligent	9,2 - 20,8	Familiarité	Main(s) occupée(s)
Gant(s)	2,6 - 13,0	Discrétion	Fragilité
Montre et bracelet	4,6 - 10,2	Discrétion	Fragilité
Anneau(x)	11,4 - 23,4	Discrétion	Fragilité
Clavier accord	3,0 - 5,0	Rétroaction haptique	Main occupée, apprentissage
Stylet	2,6 - 9,9	Familiarité	Main occupée

Tableau 2.13: Écart des vitesses de saisie de texte et résumé des caractéristiques positives et négatives par sous-catégorie.

Ci-dessous, nous expliquons les caractéristiques les moins explicites et mettons en évidence certains points transversaux à plusieurs catégories nous ayant ensuite guidés à concevoir les interfaces ControlWear et keycube :

- **Transfert de connaissance.** À l'exception des claviers accords, toutes les catégories ont potentiellement bénéficié d'un transfert de connaissances² de la disposition standard QWERTY. À cet égard, les solutions utilisant des

2. L'utilisation d'une connaissance pour améliorer l'acquisition d'une autre.

claviers accords nécessitent une longue période d'apprentissage et d'appréhension de l'interface, à l'opposé, par exemple, de celles se reposant directement sur les *claviers traditionnels*.

- **Liberté des mains.** Certaines catégories sont considérées plus performantes sous une forme multimodale, tel est le cas des solutions fondées sur les gestes de la tête et du regard, souvent en ajoutant un contrôle physique manuel. Néanmoins, cela a pour conséquence de réduire leur avantage *main libre*. De plus, pour les sous-catégories d'interfaces basées sur des gants et anneaux, bien que les mains peuvent être considérées comme libres, ce n'est plus le cas lors de leur usage, pour saisir du texte, les interactions nécessitent régulièrement d'avoir les mains libres par exemple pour effectuer des appuis du pouce sur l'intérieur des autres doigts de la main.
- **Saisie de mots.** Certaines solutions de plusieurs sous-catégories, gestes de la tête, manette(s), téléphone intelligent et anneau(x) impliquent une saisie de mots entiers (plutôt que par caractère) avec systématiquement une performance accrue concernant la vitesse de saisie de texte. Ces techniques avantageuses reposent sur l'utilisation de dictionnaires, d'ensembles de données concernant la fréquence du vocabulaire courant de la langue utilisée. Néanmoins, les performances de ces techniques peuvent décroître lorsque le vocabulaire du texte à saisir est peu commun, spécifique à un domaine professionnel et incluant notamment des références ou codes avec des chiffres.
- **Retour visuel.** Certaines catégories ne peuvent pas se passer du regard de l'utilisateur vers un retour visuel, ou plus difficilement, c'est notamment le cas des solutions dépourvu de retour tactile, telles que celles basées sur les gestes des mains en l'air, de la tête ou du regard, réduisant ainsi l'espace visuel disponible pour le reste du contenu virtuel et créant des occlusions du monde réel par l'interface visuelle (par exemple, le clavier virtuel flottant).

- **Fragilité.** Malgré leur avantage à proposer des interfaces discrètes et par conséquent socialement acceptables, presque toutes les solutions des catégories basées sur les gants, les anneaux puis les montres et bracelets sont encore à un niveau de prototype primaire avec des interfaces montrant une certaine fragilité (avec du matériel personnalisé) et une implémentation difficile dans un environnement industriel où le port de gants de sécurité est souvent obligatoire. À noter une exception pour la catégorie montre et bracelet, une interface a été proposée avec l'utilisation d'une montre connectée standard, ne requérant ainsi aucune modification de matériel, en effectuant des gestuelles de glissements sur l'écran tactile (Ahn *et al.*, 2017). Cependant, leur technique ne permettait pas la saisie de chiffre et ne libérait pas le regard des utilisateurs.
- **Parole.** Nous avons relevé trois études concernant les visiocasques et l'usage de la parole pour saisir du texte (Bowman *et al.*, 2002; Pick *et al.*, 2016; Ghosh *et al.*, 2020). Cependant, nous ne les avons pas décrites et catégorisées, car outre les nombreux inconvénients précédemment introduits (fatigue, confidentialité, acceptation sociale, environnements sonores), l'usage de la parole est aussi limité par un problème cognitif inhérent à l'humain (Shneiderman, 2000), en particulier pour des environnements de travail requérant de la concentration. L'auteur rapporte que la partie du cerveau dédiée à la résolution de problème supporte aussi la gestion de la parole et de l'écoute, par conséquent, c'est plus difficile de parler et penser en même temps. L'auteur poursuit en précisant que la partie du cerveau dédiée à l'activité physique et notamment celle de la coordination oeil-main est différente, par conséquent, il est plus aisé de parallèlement réfléchir et par exemple de déplacer un curseur ou d'appuyer sur des boutons pour saisir du texte.

Par ailleurs, peu d'études et solutions se sont positionnées pour un environnement de travail de bureau. Sept au total, dont 6 catégorisées dans les interfaces basées sur l'utilisation du clavier traditionnel, par conséquent pour des situations où l'utilisateur est relativement immobile (souvent pour des expériences de réalité virtuelle). Néanmoins, une étude concernait l'interaction multimodale utilisant les mouvements de la tête avec un geste de la main ou en appuyant sur le bouton d'un dispositif externe d'un visiocasque de réalité augmentée, mais les résultats rapportés (notamment des vitesses de 5,41 et 6,58 mots par minute) ne sont pas suffisamment convaincants pour la productivité requise par un environnement de travail de bureau (Derby *et al.*, 2019). Deux solutions seulement se sont positionnées pour un usage industriel, les interfaces *VISAR* et *Kinemic Wave*, toutes deux, basées sur l'usage des gestes de la main en l'air, la première avec les capteurs (caméras) du visiocasque seulement, la seconde en reconnaissant les mouvements du poignet avec un bracelet connecté (mais dépourvu d'études utilisateurs mentionnant les performances de saisie de texte). Dans les deux cas, le bras tenu en l'air cause une fatigue, un effet connu sous le nom de *syndrome du bras de gorille* (Hansberger *et al.*, 2017), par ailleurs, nous considérons ce type d'interaction d'autant plus incompatibles avec l'utilisation d'outils (parfois lourds) ou pour des espaces de travail restreints.

Enfin, à la suite de cet état de l'art, notre première hypothèse d'envisager pour l'environnement industriel l'utilisation d'une montre connectée avec le visiocasque de réalité augmentée s'est réalisée par soustraction. Nous avons éliminé les autres sous-catégories d'interfaces de saisie de texte suivant leurs caractéristiques et défauts jugés moins adéquats avec le contexte d'utilisation industriel, présentés auparavant. Par exemple, les sous-catégories d'interfaces utilisant des composants et appareils fragiles mais aussi celles nécessitant le regard vers un retour visuel, ainsi que celles occupant les mains ou générant de la fatigue étaient considérées comme

les incompatibles avec des utilisateurs manipulant fréquemment des outils et adoptant régulièrement de postures jugées difficiles telles qu’être courbé ou à l’envers. À cet égard, seule la catégorie *Montre et bracelet* répondait à ces contraintes, à condition d’utiliser un appareil non modifié, standard et commercialisé, pour notamment éviter la caractéristique de fragilité.

Pour notre seconde hypothèse de transformer le clavier traditionnel dans un environnement de bureau, nous avons eu une stratégie différente. En effet, pour un contexte où la saisie de texte est relativement importante, nous avons favorisé la vitesse d’écriture indépendamment des caractéristiques négatives ou positives. Par conséquent, nous avons considéré la sous-catégorie des claviers traditionnels, avec une vitesse maximale trois fois supérieure aux autres sous-catégories. De plus, les claviers traditionnels offrent une flexibilité en laissant à l’utilisateur le choix d’opérer avec un ou plusieurs doigts, ou alors de fixer son regard sur l’appareil ou ailleurs. Ainsi, notre effort a été d’essayer de modifier, et plus particulièrement, de supprimer, le principal défaut lié à leur usage : la nécessité d’un support et l’immobilité.

Nous aborderons dans les deux prochains chapitres, les contributions de cette thèse concernant l’élaboration et l’étude de deux interfaces distinctes dédiées à la saisie de texte, d’abord avec ControlWear pour l’environnement industriel, puis Keycube pour l’environnement de bureau.

CHAPITRE III

CONTROLWEAR

ControlWear est une interface de saisie pour visiocasque de réalité augmentée basée sur l'utilisation d'une montre connectée¹. Lorsque l'utilisateur est invité à saisir du texte sur le visiocasque de réalité augmentée, un clavier virtuel est affiché, accompagné d'un retour visuel de l'écran de la montre connectée à travers le visiocasque. L'utilisateur peut alors saisir du texte de deux manières : (1) en dessinant les caractères avec son doigt sur l'écran tactile de la montre, ou (2) en déplaçant un curseur sur le clavier virtuel avec les mouvements de la tête pour sélectionner un caractère, puis en saisissant ce dernier par un appui simple sur l'écran de la montre connectée.

Pour rappel, l'interface ControlWear a pour but de répondre aux problématiques de la saisie de texte dans un contexte industriel.

L'organisation de ce chapitre sur l'interface ControlWear est présentée sur la Figure 3.1. Avant même d'aborder le contexte industriel et la saisie de texte, l'interface ControlWear est née du besoin d'interagir avec le visiocasque de réalité augmentée « fait maison » CARTON, ainsi, nous commençons par présenter une étude préliminaire et ses résultats sur l'utilisation combinée d'une montre con-

1. Nous utilisons le terme de montre connectée en incluant les montres intelligentes.

tée avec un visiocasque de réalité augmentée, suivi d'un état de l'art spécifique à la saisie de texte sur les montres connectées. Nous poursuivons avec les considérations de conception de l'interface ControlWear puis la présentation de deux études utilisateurs séparée par une mise à jour de l'implémentation.

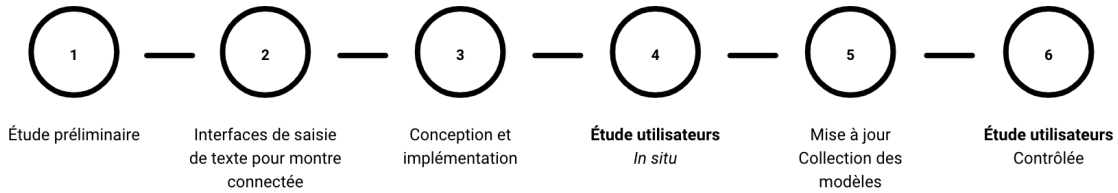


Figure 3.1: Organisation du chapitre sur l'interface ControlWear.

3.1 Étude utilisateurs préliminaire du couple visiocasque et montre connectée

Cette étude préliminaire exploratoire réalisée en janvier 2017 découle des premiers travaux de recherche sur la construction du visiocasque CARTON (Annexe A) et a pour but de mesurer l'efficacité et l'appréciation de plusieurs interfaces implémentées pour ce visiocasque. Le plan expérimental de l'étude était intra-sujets² avec une seule variable indépendante³ : l'interface, dans trois conditions, *Tête*, *Tactile* et *Montre*. Les variables dépendantes⁴ étaient la durée d'exécution des tâches, le taux de succès et la préférence des interfaces. Des parties de cette étude ont fait l'objet d'une publication (Brun *et al.*, 2017).

2. Tous les sujets (participants) exécutent différentes conditions et les mesures sont répétées.

3. Aussi appelée *facteur*, la variable est *indépendante* du comportement des participants, ces derniers n'ont aucun contrôle sur celle-ci, elle est manipulée par l'expérimentateur.

4. Variable *dépendante* des participants, de leur comportement durant l'expérimentation.

3.1.1 Interfaces

Les trois interfaces étudiées sont présentées sur la Figure 3.2. À ce stade, il ne s’agit pas encore de saisie de texte, mais seulement d’interactions de type directionnelles (gauche, droite, haut et bas) :

- *Tête*, cette interface est basée sur les mouvements de la tête, en la penchant dans l’une des directions (gauche, droite, en avant ou en arrière) suffisamment loin et rapidement (détecté en dépassant des seuils, déplacement de la tête à plus de 15 degrés par rapport à l’origine, tête droite à la verticale, en moins d’une seconde pour l’aller-retour).
- *Tactile*, cette interface est basée sur les mouvements d’un doigt (glissements, appuis simples et doubles) sur une surface tactile directement présente sur le visiocasque, entre la visière et la tête de l’utilisateur. La reconnaissance des glissements s’opère par seuil en calculant l’angle entre les coordonnées (à deux dimensions) du premier appui sur l’écran tactile et les dernières coordonnées lors du relâchement. La valeur de l’angle calculé varie entre 0 et 360 degrés et chaque direction (droite, gauche, haut et bas) est définie dans un écart de 90 degrés.
- *Montre*, cette interface est similaire à l’interface *Tactile*, excepté qu’elle est implémentée pour l’écran tactile de la montre connectée et renvoie les informations (des interactions) au visiocasque CARTON (basé sur un téléphone intelligent).

3.1.2 Participants

Dix volontaires ont participé à cette étude (5 femmes, 5 hommes, entre 25 et 69 ans, 34 en moyenne). Les participants ont été recrutés par le bouche-à-oreille

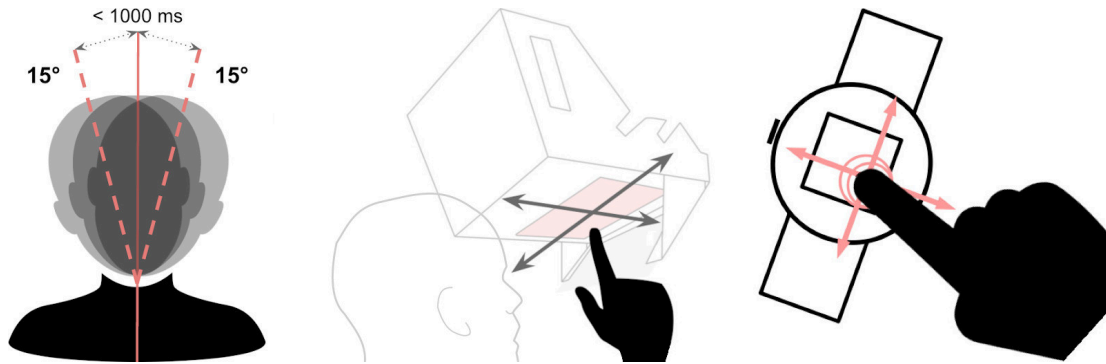


Figure 3.2: Schématique d'utilisation des interfaces *Tête*, *Tactile* et *Montre*.

dans les bureaux de l'Université TÉLUQ à Montréal. Tous les participants avaient déjà utilisé un téléphone intelligent et connaissaient les gestuelles tactiles associées (glissement rapide d'un doigt), six d'entre eux avaient déjà brièvement utilisé un visiocasque de réalité augmentée et un seul avait utilisé une montre connectée (mais dépourvu d'écran tactile) pour faire du sport. Les participants pouvaient repartir avec une création résultant d'une tâche de l'expérimentation (un origami) en guise de compensation pour leur participation.

3.1.3 Matériel

Le matériel utilisé pour l'étude incluait un visiocasque de réalité augmentée CARTON (basé sur le téléphone intelligent Motorola Nexus 6 avec Android 7.0), une montre connectée Motorola 360 (1^{re} génération avec Android Wear 1.4.0) puis des feuilles de couleurs et une règle pour réaliser des origamis.

3.1.4 Logiciels

À ce stade, ControlWear fut initialement développé sous forme de bibliothèque logicielle Android afin de faciliter (1) l'intégration de la reconnaissance des gestes sur l'écran tactile d'une montre connectée (Android Wear) et (2) le renvoi des informa-

tions aux applications du visiocasque. Une application mobile pour le visiocasque CARTON (Figure 3.3) fut développée en intégrant l’interface ControlWear pour permettre aux participants de réaliser la tâche demandée à travers trois activités : un tutoriel sur l’utilisation des interfaces, un jeu de rapidité et un assistant pour la création d’origami.

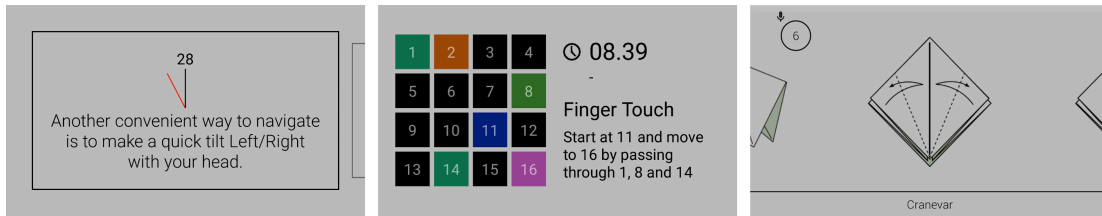


Figure 3.3: Interfaces visuelles (couleurs inversées) de l’application mobile pour le visiocasque CARTON (de gauche à droite) : tutoriel, jeu de rapidité et assistant à la création d’origami.

3.1.5 Tâche

Les participants devaient réaliser une suite de trois activités avec chacune des interfaces :

- Entraînement en utilisant le tutoriel, pour se familiariser avec la montre connectée, le visiocasque et les interfaces.
- Jeu de rapidité pour mesurer les vitesses d’interactions des utilisateurs sous la contrainte de temps, prenant la forme d’un parcours multidirectionnel (avec des points de contrôle) en déplaçant une simple plateforme sur une matrice 4x4. Le nombre de mouvements (d’interaction) minimum pour déplacer la plateforme entre le départ et l’arrivée était de 12, avec au moins 2 mouvements nécessaires dans chacune des directions.
- Création d’un origami (considéré facile, une tulipe en deux parties) en utilisant l’assistant représenté sous la forme d’une aide visuelle étape par étape (navigable avec les interactions directionnelles gauche et droite), afin

de mesurer la préférence des interfaces lorsque les mains des utilisateurs sont occupées à manipuler des objets.

3.1.6 Procédure

Pendant quatre jours, l'instructeur a accueilli les participants individuellement pour leur présenter le déroulement de l'expérimentation, le matériel et les interfaces. Les participants commençaient à réaliser les différentes activités de la tâche toujours dans le même ordre : l'entraînement, le jeu de rapidité puis la création de l'origami. Les deux premières activités étaient effectuées 4 fois, une fois pour chaque interface, puis une dernière fois librement, avec l'interface de leur choix, pour éventuellement connaître leur interface de prédilection dans l'action, hors questionnaire, hors réflexion. La dernière activité (création de l'origami) comprenait 23 étapes, la navigation des 9 premières s'effectuait avec chaque interface (3 chacune), puis les 14 dernières au choix du participant. L'ordre des interfaces a été contrebalancé entre les participants pour réduire les biais d'expérience et de succession lors des choix libres. Les participants devaient informer l'instructeur lorsqu'une interaction échouait tandis que les interactions fructueuses étaient enregistrées automatiquement dans des traces afin de pouvoir calculer les taux de succès et les temps d'exécution des activités. Après avoir effectué la tâche au complet, les participants devaient remplir un questionnaire contenant 16 questions (Annexe D.1), notamment pour récolter des données démographiques puis des informations liées à leur expérience et préférence des interfaces. L'étude durait en moyenne 40 minutes par participant.

3.1.7 Résultats

Les résultats provenant des questionnaires, des traces et des remarques de l'instructeur sont présentés sur la Figure 3.4. Au total, 2114 interactions ont été effectuées (en moyenne 211 par participant).

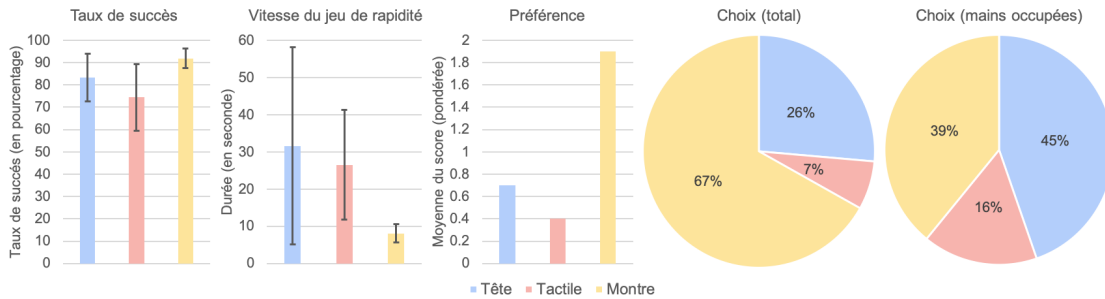


Figure 3.4: Résultats du taux de succès, de la vitesse du jeu de rapidité, de la préférence et du choix (total et pour les mains occupées) pour chacune des interfaces.

3.1.7.1 Taux de succès

L'interface *Montre* a obtenu le meilleur taux de succès dans la tâche avec 91,90 % (écart-type = 4,42), suivi des interfaces *Tête*, *Tactile* avec respectivement 83,37 % (écart-type = 10,65) et 74,40 % (écart-type = 14,88). Une analyse de variance a montré que le facteur interface a un effet significatif sur le taux de succès ($F_{2,27} = 6,487; p < 0,05$). Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a été effectué pour déterminer qu'il y avait des effets significatifs entre toutes les interfaces exceptées entre *Tête* et *Tactile* ($p = 0,138$). L'instructeur a observé durant l'étude que la zone dédiée aux glissements de l'interface *Tactile* n'était pas assez grande et certains participants effectuaient le geste en dehors, diminuant ainsi le taux de succès.

3.1.7.2 Vitesse d'exécution

L'interface *Montre* a obtenu la meilleure vitesse d'exécution du jeu de rapidité avec 8,11 s (écart-type = 2,48), entre 3 et 4 fois plus rapide que les interfaces *Tactile* et *Tête* avec respectivement 26,50 s (écart-type = 14,76) et 31,61 s (écart-type = 26,54). Une analyse de variance a montré que le facteur interface a un effet significatif sur la vitesse d'exécution ($F_{2,27} = 4,937; p < 0,05$). Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a été effectué pour déterminer qu'il y avait des effets significatifs entre toutes les interfaces exceptées entre *Tête* et *Tactile* ($p = 0,601$).

3.1.7.3 Préférence et choix

Le calcul de la préférence provient du classement des interfaces dans le questionnaire, le score est pondéré de la sorte, la première interface obtient 2 points, 1 point pour la seconde et 0 pour la dernière. L'interface *Montre* obtient le meilleur score avec 1,9 (sur 2,0 maximum, elle fut classée seconde que par une seule personne), suivi respectivement de l'interface *Tête*, *Tactile* avec 0,7 et 0,4. Les traces ont permis de rapporter le choix des participants lorsqu'ils pouvaient effectuer les activités de la tâche avec l'interface qu'ils souhaitaient. Les résultats reflètent les préférences, l'interface *Montre* fut choisie à 67 % sur l'ensemble des activités, suivi respectivement par les interfaces *Tête* et *Tactile* avec 26 % et 7 %. Naturellement, l'interface *Tête* fut particulièrement utilisée (45 %) lorsque les mains des participants étaient occupées (à construire un origami). Pour l'activité du jeu de rapidité, l'interface *Montre* fut choisie à 100 %.

3.1.8 Discussion

Bien que les résultats restent très dépendants du visiocasque utilisé (peu adapté pour le contexte industriel) et des implémentations des interfaces (notamment pour les taux de succès), la solution initiale de ControlWear, représenté par l'interface *Montre* semble prometteuse. Aucun participant n'avait utilisé de montre connectée avec un écran tactile auparavant, mais tous ont adopté l'interface aisément, car la gestuelle (glissement) utilisée était similaire à celle déjà rencontrée sur les téléphones intelligents. Ainsi, l'ensemble des résultats était cohérent et montrait une tendance préférentielle de l'interface *Montre* pour toutes les variables dépendantes et remarques des participants : « *[l'interface Montre est] plus intuitif* », « *[requiert] moins d'effort* ».

Ces résultats et l'analyse de l'état de l'art général nous ont poussés à explorer l'usage de la montre connectée (standard, sans modification) comme interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée. Une exploration qui a commencé avec la partie suivante, un état de l'art spécifique aux interfaces de saisie de texte pour montres connectées.

3.2 État de l’art spécifique : interface de saisie de texte pour montre connectée

Cet état de l’art est spécifique aux interfaces de saisie de texte pour montres connectées seules, allant au-delà de l’usage combiné avec un visiocasque de réalité augmentée. Différents travaux seront présentés et illustrés puis analysés (en fin de section) pour faire ressortir leurs faiblesses et forces, notamment dans le contexte industriel. Les travaux sont catégorisés en deux groupes : ceux basés sur l’utilisation de l’écran tactile et ceux basés sur d’autres capteurs (par exemple des boutons physiques ou la centrale inertielle). Les interfaces proposées combinant autant l’usage de l’écran tactile avec celui d’un autre composant sont catégorisées suivant leur usage jugé le plus pertinent, souvent mis en avant par les auteurs. Pour chaque catégorie, les travaux sont présentés dans l’ordre chronologique de publication puis résumés dans un tableau rapportant leur vitesse de saisie de texte (en mots par minute, *mpm*).

3.2.1 Écran tactile

Les travaux utilisant l’écran tactile de la montre connectée sont sous-catégorisés avec d’une part ceux basés uniquement sur des appuis discrets (simple et rapide) du doigt et d’autre part ceux nécessitant des appuis continus (tel qu’un glissement).

3.2.1.1 Appui discret

Les appuis discrets (au sens scientifique, en opposition à *continu*) sont caractérisés par le contact rapide et fixe d’un doigt sur l’écran tactile de la montre, souvent pour appuyer sur un bouton virtuel.

ZoomBoard est un clavier virtuel QWERTY nécessitant deux actions pour saisir

un caractère. Un premier appui sur l'écran tactile de la montre connectée permet d'agrandir la zone visée du clavier (Figure 3.5), et un second pour saisir le caractère, après quoi, la taille du clavier est réinitialisée (Oney *et al.*, 2013).



Figure 3.5: *ZoomBoard*. Aggrandissement de la disposition du clavier virtuel. Illustration extraite de (Oney *et al.*, 2013).

La disposition des lettres par ordre alphabétique fut aussi explorée avec un clavier virtuel regroupant les caractères dans 6 boutons virtuels. La zone d'édition de texte est placée au centre (verticalement) avec les moitiés des boutons au-dessus et en dessous (Figure 3.6). Le clavier intègre une désambiguïsation⁵ des caractères en proposant le mot suggéré (le plus probable) directement dans la zone d'édition de texte, pouvant être saisi par un glissement latéral vers la droite. Un glissement latéral vers la gauche permet de corriger et un simple appui sur la zone d'édition ajoute un espace, tandis que des appuis subséquents font apparaître les autres mots suggérés (Komninos et Dunlop, 2014).

Callout et *ZShift* sont deux interfaces d'un clavier virtuel QWERTY proposant un retour visuel agrandie lorsque le doigt touche l'écran tactile de la montre (Figure 3.7) afin de saisir le caractère sélectionné après relâchement du doigt. Pour *Callout*, seul le bouton sélectionné apparaît grandit, tandis qu'avec *ZShift* le bouton sélectionné est agrandi puis mis en valeur (en couleur) au milieu des boutons

5. Lorsqu'un bouton (virtuel ou non) correspond à plusieurs caractères, il y a une *ambiguïté* vis-à-vis du caractère à saisir, les méthodes de désambiguïsation peuvent prendre plusieurs formes et permettent de choisir le caractère (automatiquement ou non).

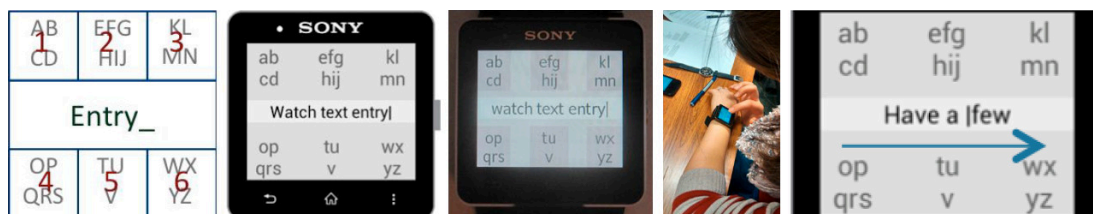


Figure 3.6: Clavier virtuel alphabétique avec suggestion des mots. Illustration extraite de (Komninos et Dunlop, 2014).

virtuels à proximité pour faciliter le choix. L'espace et la correction sont réalisés avec des glissements latéraux gauche et droit (en plus d'être accessibles par un bouton virtuel dédié). Les glissements verticaux permettent de changer l'ensemble de caractères afin d'afficher les chiffres ou caractères spéciaux (Leiva *et al.*, 2015).

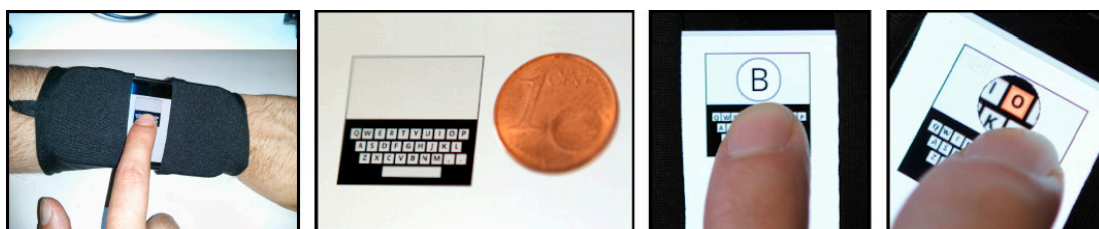


Figure 3.7: *Callout* et *ZShift*. Agrandissement visuel de la zone d'appui. Illustration extraite de (Leiva *et al.*, 2015).

UniWatch est clavier virtuel basé sur *UniGlyph* (Poirier et Belatar, 2007), les caractères sont affectés à différents types de symbole : traits diagonaux, traits courbés (demi-cercle) et traits horizontaux ou verticaux (Figure 3.8). Les auteurs ont proposé de saisir les symboles soit en les dessinant, soit en effectuant des gestes de glissement ou par l'intermédiaire de boutons virtuels. Ils ont implémenté uniquement la dernière solution, en attribuant les glissements pour l'espace et la correction. Plusieurs caractères sont attribués à chaque symbole, la solution intègre un système de désambiguïsation et suggère différents mots saisissables par un appui sur l'écran tactile (Poirier et Belatar, 2015; Poirier et Belatar, 2016).



Figure 3.8: *UniWatch*. Affectation d'un symbole (trait diagonal, vertical et courbé) pour chaque caractère. Illustration extraite de (Poirier et Belatar, 2016).

DualKey est basé sur la reconnaissance des doigts appuyant l'écran tactile. Chaque touche virtuelle comprend deux caractères, le caractère de gauche est saisi lorsque l'utilisateur appuie avec l'index (de la main droite), celui de droite est saisi avec n'importe quel autre doigt (Figure 3.9). La reconnaissance du doigt s'effectue en plaçant un phototransistor et capteur optique sur le bout de l'index, permettant ainsi de détecter la distance de ce dernier avec une surface. Un bouton virtuel spécifique permet de permuter (et corriger) rapidement le dernier caractère saisi entre celui de gauche et celui de droite. Les auteurs ont implémenté une disposition personnalisée, SWEQTY, pour optimiser le nombre de changements de doigts tout en restant proche de la disposition traditionnelle QWERTY afin de bénéficier d'un transfert de connaissance (Gupta et Balakrishnan, 2016).



Figure 3.9: *DualKey*. Boutons virtuels réagissant différemment suivant le doigt utilisé. Illustration extraite de (Gupta et Balakrishnan, 2016).

ETAO est un clavier virtuel avec une disposition personnalisée, basée sur la fréquence des lettres dans la langue anglaise. Les 8 lettres les plus fréquentes sont saisissables avec un seul appui, tandis que les autres nécessitent au moins deux

appui, le premier étant pour choisir un autre groupe de lettres (Figure 3.10). L'espace et la correction s'effectuent avec la gestuelle de glissement vers le bas et la gauche. La minimisation du nombre de lettres affichées a pour but d'améliorer la précision en agrandissant la taille des boutons virtuels (Darbar *et al.*, 2016a).



Figure 3.10: *ETAO*. Disposition des lettres suivant leur fréquence dans la langue anglaise. Illustration extraite de (Darbar *et al.*, 2016a).

ForceBoard est un clavier virtuel utilisant la sensibilité à la force d'appui de certains écrans tactiles. Afin d'agrandir la taille de chaque bouton virtuel, deux caractères y sont associés (Figure 3.11), celui inscrit à gauche se saisit en appuyant légèrement, tandis qu'un appui fort permet de saisir celui de droite. Les auteurs n'ont pas implémenté leur solution sur une montre connectée, mais l'ont simulé sur un téléphone intelligent (Hsiu *et al.*, 2016).

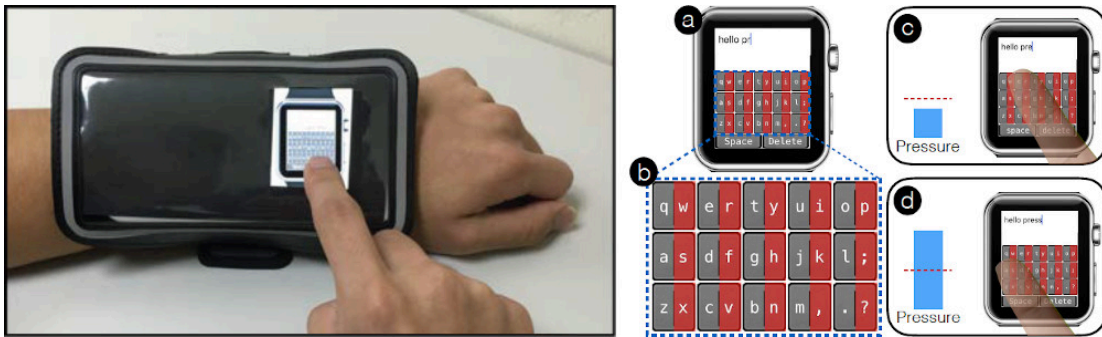


Figure 3.11: *ForceBoard*. Clavier virtuel sensible à la force d'appui. Illustration extraite de (Hsiu *et al.*, 2016).

D'autre encore, ont proposé un clavier virtuel QWERTY dont la transparence est contrôlée par l'inclinaison de la montre dans le but d'offrir rapidement, par

l'intermédiaire de couches, un grand espace dédié soit à la saisie des caractères soit à la lecture du texte (Figure 3.12). Les utilisateurs saisissent des caractères (présent sur des boutons virtuels) par des appuis simples sur l'écran tactile de la montre connectée (Dunlop *et al.*, 2017).

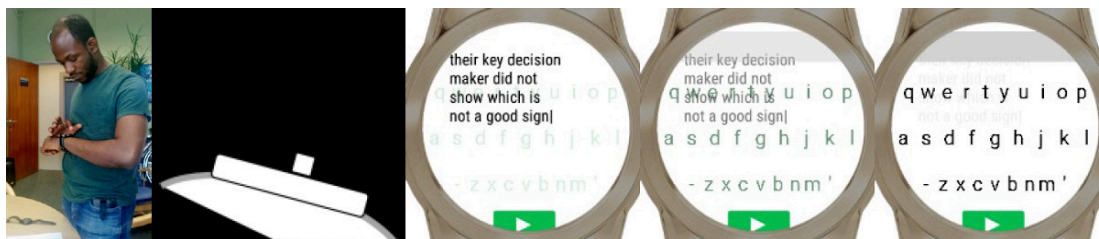


Figure 3.12: Interface de saisie de texte pour montre connectée associant transparence et inclinaison. Illustration extraite de (Dunlop *et al.*, 2017).

DiaQwerty est un clavier virtuel QWERTY ayant adopté des boutons disposés en diamant plutôt que de forme rectangulaire classique (Figure 3.13), la disposition générale est sensiblement différente si l'écran est rond ou rectangulaire. La solution permet d'avoir des boutons plus grands (de 10 %) qu'avec une forme rectangulaire et ainsi améliorer la précision. Lorsqu'un appui est effectué sur les espaces vides latéraux, le bouton le plus proche est saisi (Kim *et al.*, 2018b).

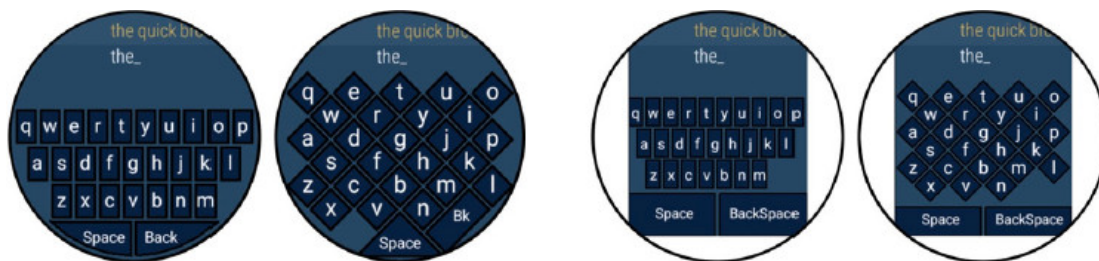


Figure 3.13: *DiaQwerty*. Disposition des boutons virtuels en forme de diamant. Illustration extraite de (Kim *et al.*, 2018b).

VelociWatch est un clavier virtuel QWERTY avec un système prédictif permettant d'afficher des suggestions de mots dans les quatre coins de la zone d'édition

du texte (Figure 3.14). Les mots suggérés sont saisis en effectuant un geste de glissement diagonal en direction de la suggestion respective. La suggestion la plus probable est placée en haut à gauche. Un simple appui n'importe où sur la zone d'édition du texte permet de saisir un espace et un glissement vers la gauche permet d'effectuer une correction (Vertanen *et al.*, 2019).

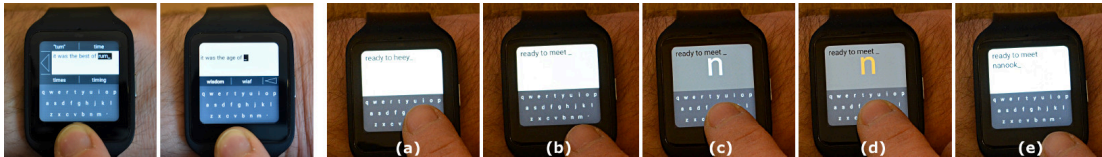


Figure 3.14: *VelociWatch*. Intégration dynamique des suggestions de mots. Illustration extraite de (Vertanen *et al.*, 2019).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>ZoomBoard</i> , agrandissement de la disposition (Oney <i>et al.</i> , 2013)	9,3
Clavier alphabétique à 6 boutons (Komninos et Dunlop, 2014)	8,1
<i>Callout</i> et <i>ZShift</i> , agrandissement visuel de la zone d'appui (Leiva <i>et al.</i> , 2015)	6,0
<i>UniWatch</i> , affectation de symboles simplistes (Poirier et Belatar, 2016)	9,8
<i>DualKey</i> , sensibilité au doigt d'appui (Gupta et Balakrishnan, 2016)	21,6
<i>ETAO</i> , disposition basée sur la fréquence des lettres (Darbar <i>et al.</i> , 2016a)	12,5
<i>ForceBoard</i> , sensibilité à la force d'appui (Hsiu <i>et al.</i> , 2016)	12,4
Clavier virtuel avec transparence sensible à l'inclinaison (Dunlop <i>et al.</i> , 2017)	27,2
<i>DiaQwerty</i> , boutons virtuels en forme de diamant (Kim <i>et al.</i> , 2018b)	24,6
<i>VelociWatch</i> , suggestions de mots (Vertanen <i>et al.</i> , 2019)	17,0

Tableau 3.1: Résumé de la sous-catégorie Appui discret.

3.2.1.2 Appui continu

Les appuis continus sont caractérisés par le contact d'un doigt en mouvement (rapide ou lent) sur l'écran tactile de la montre.

SwipeBoard est un clavier virtuel basé sur la gestuelle « glissement », exclusivement unidirectionnelle (incluant les diagonales). Le premier glissement permet de choisir un groupe de caractère, et le deuxième glissement permet de sélectionner et saisir un des caractères du groupe (Figure 3.15). Attendre pendant 2 secondes ou effectuer un glissement vers le bas permet d'annuler le premier glissement (le choix du groupe). La correction et l'espace s'effectuent respectivement avec des doubles glissements⁶ diagonale-gauche et diagonale-droite. Le double glissement vers le haut permet d'activer un mode pour saisir des chiffres. La disposition des caractères est basée sur le QWERTY pour bénéficier d'un transfert de connaissance. Les glissements peuvent être effectués n'importe où sur l'écran tactile de la montre, ainsi cette interface a l'avantage de libérer le regard des utilisateurs, si ces derniers connaissent suffisamment la disposition du clavier. Cette interface demande toujours un minimum de deux actions pour saisir un caractère (Chen *et al.*, 2014).

DragKeys est un clavier virtuel basé sur la même gestuelle, mais nécessitant qu'une seule action, avec des glissements pouvant être multidirectionnel. Par exemple, pour saisir certains caractères, le glissement devra d'abord être effectué dans une des 8 directions (horizontale, verticale et diagonale), puis continuera dans une autre direction (Figure 3.16). Les 8 lettres les plus fréquentes de la langue anglaise peuvent être saisies avec un glissement unidirectionnel tandis que les autres ont été

6. Cette action reste inexpliquée par les auteurs de l'interface, elle représente soit un glissement répété deux fois rapidement (plus probable) ou un glissement avec deux doigts.

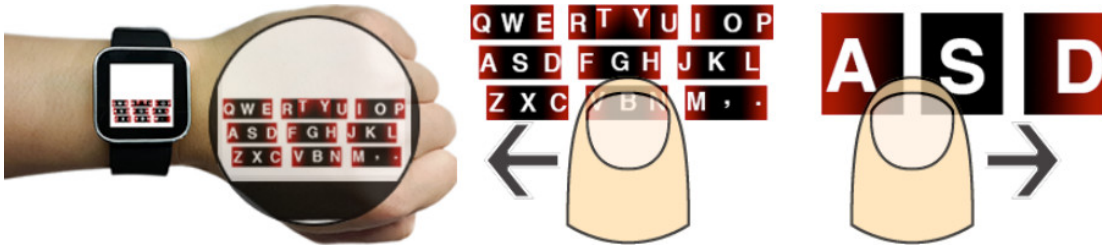


Figure 3.15: *SwipeBoard*. Clavier virtuel basé sur la combinaison de plusieurs glissements unidirectionnels. Illustration extraite de (Chen *et al.*, 2014).

disposés pour que le glissement ressemble à la forme de la lettre. Un simple appui permet de saisir un espace, et un glissement latéral avec deux doigts permet de supprimer un caractère. Cette interface permet aussi à l'utilisateur de commencer le glissement n'importe où sur l'écran tactile, libérant le regard de l'utilisateur, si ce dernier connaît suffisamment la disposition des caractères (Cho *et al.*, 2014).

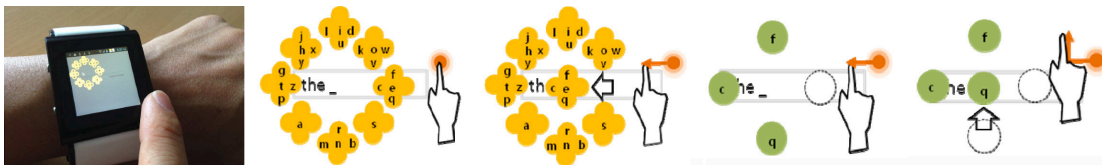


Figure 3.16: *DragKeys*. Clavier virtuel basé sur le glissement multidirectionnel. Illustration extraite de (Cho *et al.*, 2014).

Virtual Sliding QWERTY (VSK) est un clavier virtuel QWERTY utilisant la gestuelle glisser-déposer, afin de naviguer à travers un clavier qui est toujours visuellement élargi pour rendre les boutons plus accessibles (Figure 3.17). Outre leur présence par des boutons virtuels, l'espace et la correction sont aussi saisissables par les gestuelles de glissements rapides latéraux gauche et droite. Les auteurs n'ont pas implémenté leur solution sur une montre, mais une simulation sur tablette (Cha *et al.*, 2015).

SplitBoard est aussi un clavier virtuel QWERTY ayant d'apparent qu'une partie



Figure 3.17: *Virtual Sliding QWERTY (VSK)*. Naviguer à travers le clavier virtuel. Illustration extraite de (Cha *et al.*, 2015).

incomplète de l'ensemble des caractères, disposés sur 15 boutons virtuels (Figure 3.18). L'utilisateur doit faire un glissement latéral rapide soit vers la gauche ou vers la droite pour changer d'ensemble. La correction et l'espace restent toujours accessibles par deux boutons virtuels placés au bas de l'interface visuelle. Un troisième ensemble (de seulement 4 boutons virtuels) est dédié à la validation, aux majuscules puis à l'accès aux numéros et caractères spéciaux (Hong *et al.*, 2015).

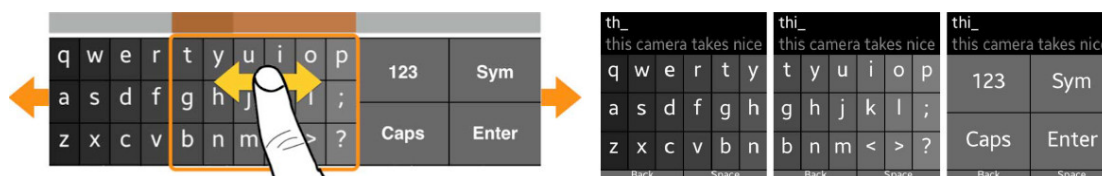


Figure 3.18: *SplitBoard*. Séparation du clavier virtuel. Illustration extraite de (Hong *et al.*, 2015).

DriftBoard est un clavier virtuel mobile comprenant un point fixe pour sélectionner et saisir les caractères (Figure 3.19) avec une seule action. L'utilisateur déplace l'ensemble de la disposition des caractères (QWERTY) avec un glissement de doigt afin de superposer le point fixe et le caractère souhaité, pour saisir ce dernier lorsque le doigt relâche l'écran tactile de la montre. Cette solution s'adapte à n'importe quelle forme d'appareil de taille variable (Shibata *et al.*, 2016).

SwipeKey est un clavier virtuel avec une disposition par ordre alphabétique mixant



Figure 3.19: *DriftBoard*. Déplacer le clavier virtuel sous un curseur fixe pour saisir des caractères. Illustration extraite de (Shibata *et al.*, 2016).

la gestuelle de glissement unidirectionnel avec un ensemble restreint de boutons. Pour chaque bouton virtuel, il y a 4 caractères, pour sélectionner l'un d'eux, le glissement doit démarrer depuis l'espace du bouton et partir dans la direction respective du caractère (Figure 3.20). L'espace et la correction s'effectuent avec des glissements (droite ou gauche) sur la zone d'édition (Shao *et al.*, 2016).



Figure 3.20: *SwipeKey*. Glissements unidirectionnels depuis des boutons virtuels. Illustration extraite de (Shao *et al.*, 2016).

Invisiboard est un clavier alphabétique composé de 9 boutons virtuels invisibles et incluant la saisie de mots par gestuel (Figure 3.21). L'utilisateur peut effectuer un glissement de doigt à travers plusieurs boutons pour saisir un mot entier, incluant un système prédictif pour la désambiguïsation des caractères. L'utilisateur doit effectuer des glissements verticaux pour choisir parmi les différents mots suggérés, ou vers la gauche pour supprimer le dernier mot saisi. En cas de doute, l'utilisateur peut faire apparaître (en semi-transparent) la disposition du clavier en effectuant un appui double n'importe où sur l'écran tactile (Mottelson *et al.*, 2016).

WatchWriter est un clavier virtuel QWERTY incluant la suggestion de mots (sai-

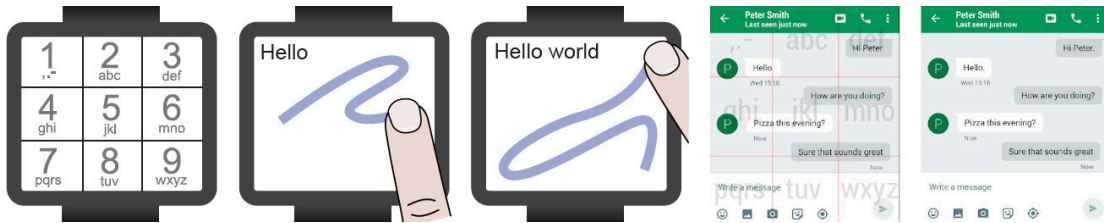


Figure 3.21: *Invisiboard*. Disposition de clavier virtuel invisible. Illustration extraite de (Motelson *et al.*, 2016).

sisable par simple appui sur l'écran tactile) et la saisie de mot par la gestuelle : un glissement de doigt passant par l'ensemble des lettres composant le mot. La correction (accessible avec un bouton virtuel) s'opère par mot complet plutôt que par caractère pour encourager la saisie de mots complets (Gordon *et al.*, 2016).

D'autres encore, ont conçu un clavier virtuel mélangeant l'écriture manuscrite simplifiée avec des boutons virtuels. Les auteurs ont proposé de dessiner des symboles simples proches des caractères (Figure 3.22), une reconnaissance automatique des symboles permettait ensuite de proposer les 5 caractères les plus probables saisisables par un appui simple ou en attendant deux secondes pour saisir le caractère ayant reçu la plus haute probabilité (Nascimento *et al.*, 2017).

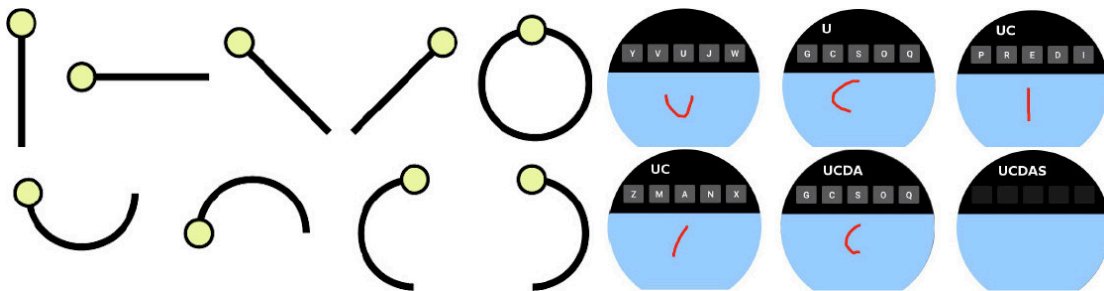


Figure 3.22: Interface de saisie de texte pour montre connectée basée sur l'écriture manuscrite simplifiée. Illustration extraite de (Nascimento *et al.*, 2017).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>SwipeBoard</i> , combinaison de glissements (Chen <i>et al.</i> , 2014)	19,6
<i>DragKeys</i> , glissement multidirectionnel (Cho <i>et al.</i> , 2014)	-
<i>Virtual Sliding QWERTY (VSK)</i> (Cha <i>et al.</i> , 2015)	16,1
<i>SplitBoard</i> , disposition du clavier glissante (Hong <i>et al.</i> , 2015)	11,9
<i>DriftBoard</i> , déplacement précis du clavier (Shibata <i>et al.</i> , 2016)	8,8
<i>SwipeKey</i> , glissements depuis un bouton virtuel (Shao <i>et al.</i> , 2016)	11,0
<i>Invisiboard</i> , clavier virtuel invisible (Mottelson <i>et al.</i> , 2016)	10,6
<i>WatchWriter</i> , saisie de mots par gestuelle (Gordon <i>et al.</i> , 2016)	23,0
Écriture manuscrite simplifiée (Nascimento <i>et al.</i> , 2017)	-

Tableau 3.2: Résumé de la sous-catégorie Appui continu.

3.2.2 Autres composants

Tous les autres travaux n'étant pas basés sur l'utilisation de l'écran tactile sont sous-catégorisés par type de capteurs utilisés : tangible ou non tangible.

3.2.2.1 Capteurs tangibles

Nous considérons les capteurs tangibles comme tout ceux pouvant être manipulés et touchés physiquement, tels qu'un bouton.

Button Keyboard est un boîtier de taille réduite (33 x 33 mm) composé de seulement 9 boutons sensibles au toucher avant appui. La disposition est inspirée du QWERTY, trois lettres sont affectées par boutons et sont sélectionnées dépendamment de la sensibilité d'appui, tandis que l'espace, la correction et la validation (entrée) s'effectuent avec des gestes de glissements latéraux, respectivement vers la droite, la gauche et en bas (Figure 3.23). Les auteurs ont conceptualisé le port de ce clavier sur le poignet pour écrire sur un autre dispositif accompagné d'un

écran, tel qu'une montre connectée ou un visiocasque (Kim *et al.*, 2007).

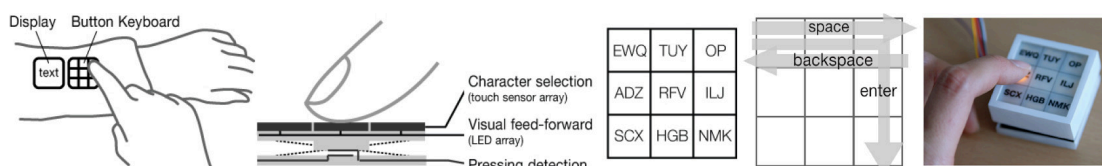


Figure 3.23: *Button Keyboard*. Boîtier de 9 boutons portable. Illustration extraite de (Kim *et al.*, 2007).

Une surface sensible au toucher a été intégrée sur le bracelet d'une montre connectée (seulement sur la partie dirigée vers l'utilisateur lorsque la montre est portée) pour créer une interface de saisie de texte (Figure 3.24). Les auteurs ont implémenté deux techniques différentes, dans un cas la surface tactile est divisée en un nombre réduit d'espace, chacun regroupant plusieurs caractères, la sélection et saisie d'un caractère s'opèrent en appuyant plusieurs fois sur le même espace dédié. Dans l'autre cas, des espaces plus petits sont attribués individuellement à chaque caractère, l'utilisateur doit laisser glisser son doigt sur la surface tactile pour sélectionner un caractère qui sera saisi lors du relâchement. Les auteurs ont mené une étude utilisateurs montrant que la première technique offrait de meilleurs résultats, notamment en termes de vitesse de saisie de texte (Funk *et al.*, 2014).



Figure 3.24: Interfaces de saisie de texte pour montre connectée basées sur un bracelet tactile. Illustration extraite de (Funk *et al.*, 2014).

COMPASS est un clavier utilisant un anneau circulaire tangible (autour de l'écran)

afin de sélectionner des caractères disposés par ordre alphabétique (Figure 3.25). Les mouvements de l’anneau permettent de déplacer trois curseurs tandis qu’un bouton physique permet de saisir l’un des caractères sélectionnés. Un système de désambiguïsation choisira le caractère le plus probable, un appui long (plus de 250 ms) sur le bouton physique permet ensuite de choisir parmi plusieurs mots suggérés. Les auteurs ont intégré une aide visuelle dynamique, après chaque saisie de caractère, certaines lettres sont mises en valeur et les curseurs sont déplacés automatiquement pour minimiser les déplacements (Yi *et al.*, 2017).

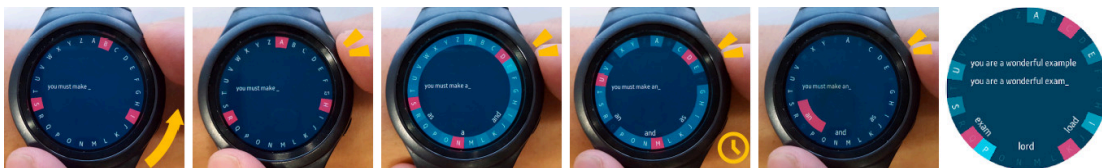


Figure 3.25: *COMPASS*. Utilisation (rotation) d’un anneau circulaire tangible. Illustration extraite de (Yi *et al.*, 2017).

FingerT9 est une interface de saisie de texte pour montre connectée basée sur les appuis du pouce avec les différentes parties des doigts de la même main. Les caractères sont disposés par trois ou quatre (ordre alphabétique) sur les différentes parties entre les articulations des doigts de la main. Un système de désambiguïsation est intégré pour choisir la bonne lettre et proposer différentes suggestions de mots sur l’interface visuelle de la montre. Trois parties distinctes sont dédiées exclusivement à l’espace, la correction et aux choix des suggestions. Les auteurs ont implémenté la détection d’appui du pouce avec 11 capteurs de pression disposés sur la main, similaire au port d’un gant (Figure 3.26). Leur solution à l’avantage d’être utilisable avec une seule main (Wong *et al.*, 2018).



Figure 3.26: *FingerT9*. Ensemble de capteurs portés entre les articulations des doigts. Illustration extraite de (Wong *et al.*, 2018).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>Button Keyboard</i> , boîtier de 9 boutons physiques (Kim <i>et al.</i> , 2007)	14,7
Bracelet sensible au toucher (Funk <i>et al.</i> , 2014)	3,5
<i>COMPASS</i> , rotation d'un anneau circulaire (Yi <i>et al.</i> , 2017)	12,5
<i>FingerT9</i> , appuis sur les doigts (Wong <i>et al.</i> , 2018)	5,4

Tableau 3.3: Résumé de la sous-catégorie Capteurs tangibles.

3.2.2.2 Capteurs non tangibles

Nous considérons comme capteurs non tangibles, tous ceux capturant des données ne pouvant être touchés par l'utilisateur, par exemple le microphone et la centrale inertielle.

InclineType est un clavier basé sur l'inclinaison du poignet, avec une disposition des caractères rectangulaires. Les mouvements du poignet permettent de sélectionner les caractères individuellement, dont la taille (équivalente à l'angle) est relative à leur fréquence d'utilisation pour la langue anglaise (Figure 3.27). Une mise en valeur visuelle permet de faire ressortir la lettre sélectionnée, et la saisie s'opère en appuyant n'importe où sur l'écran tactile de la montre, un appui long permet de corriger. Un délai (100 ms) de changement de caractère sélectionné a été intégré pour éviter les changements trop fréquents lorsque l'angle d'inclinaison est proche du seuil de séparation entre 2 caractères (Götzelmann et Vázquez,

2015).

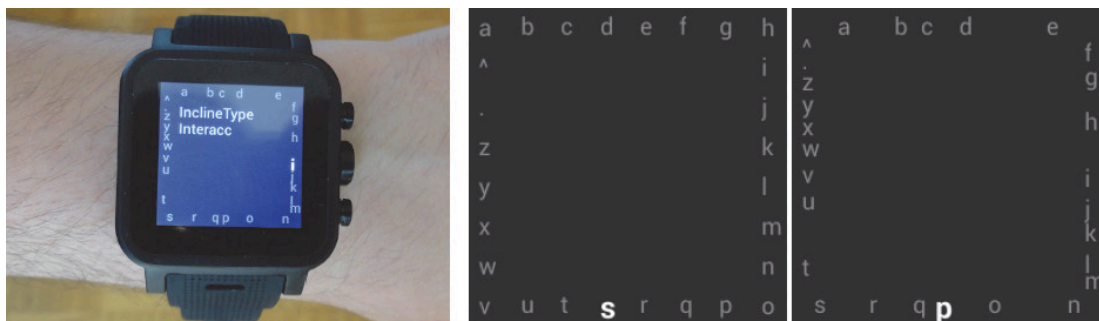


Figure 3.27: *InclineType*. Clavier rectangulaire basé sur l'inclinaison du poignet. Illustration extraite de (Götzelmann et Vázquez, 2015).

Plusieurs auteurs ont exploré la saisie de texte sur montres connectées en utilisant la reconnaissance automatique de la parole. À cet égard, une solution consiste à utiliser une adaptation de l'alphabet phonétique NATO pour corriger les erreurs de reconnaissance au lieu d'épeler directement les lettres de l'alphabet (Figure 3.28). L'auteur a notamment créé un alphabet phonétique avec des mots courants et plus faciles à retenir. La solution a été implémentée et simulée sur un téléphone intelligent (Fujiwara, 2016).

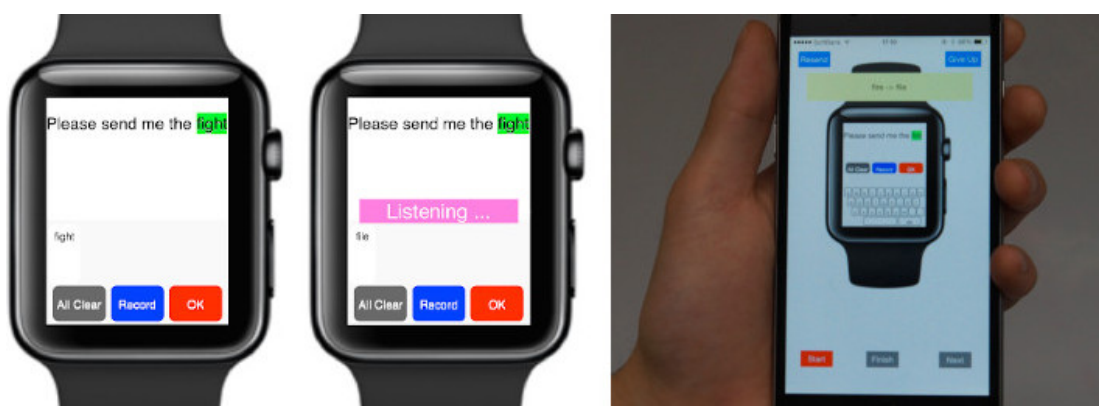


Figure 3.28: Interface de saisie de texte utilisant la reconnaissance vocale avec un alphabet phonétique simplifié. Illustration extraite de (Fujiwara, 2016).

WatchMI est une solution logicielle pour détecter l'amplitude d'appui sur un écran tactile de montre connectée traditionnel en utilisant les données de la centrale inertielle (tel que l'accéléromètre et gyroscope). Les auteurs ont ensuite appliqué leur solution à la saisie de texte (entre autres) en implémentant un clavier virtuel circulaire avec trois caractères par bouton (Figure 3.29). La désambiguïsation s'opère avec la force d'appui, un appui léger pour tel caractère tandis qu'un appui modéré ou fort pour les deux autres caractères (Yeo *et al.*, 2016).

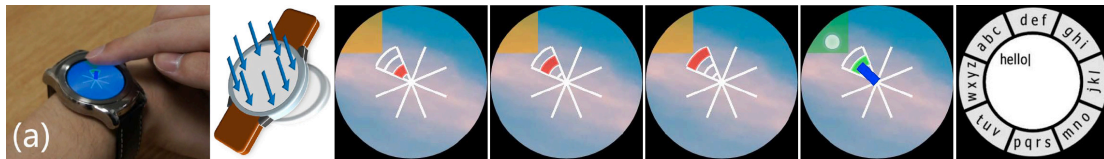


Figure 3.29: *WatchMI*. Écran tactile traditionnel sensible à la force d'appui par l'intermédiaire de la centrale inertielle de la montre connectée. Illustration extraite de (Yeo *et al.*, 2016).

D'autres encore, ont imaginé placer 4 capteurs à effet Hall (pour mesurer les variations du champ magnétique) sur les coins d'une montre connectée, puis un aimant au bout d'un doigt de l'utilisateur afin de détecter ses différents mouvements (Figure 3.30). La saisie de texte est basée sur *EdgeWrite*, l'utilisateur doit déplacer son doigt à différent coin de la montre dans un ordre précis, avec des enchaînements différents dédiés à chaque caractère. Pour segmenter les caractères (différencier les enchaînements entre eux), ils ont implémenté un seuil de temps de 950 ms. Les auteurs n'ont pas implémenté leur solution sur une montre connectée, mais avec une carte électronique de prototypage (Darbar *et al.*, 2016b).

Vouch-T est une interface multimodale de saisie de texte pour montre connectée mélangeant la reconnaissance de la voix (aux lettres seules, car considérées moins sensibles aux bruits) avec le toucher (Figure 3.31). Les auteurs ont implémenté deux techniques, dans le premier cas, les caractères sont groupés par 3 dans des boutons virtuels suivant l'ordre alphabétique, lorsque l'utilisateur appuie sur un

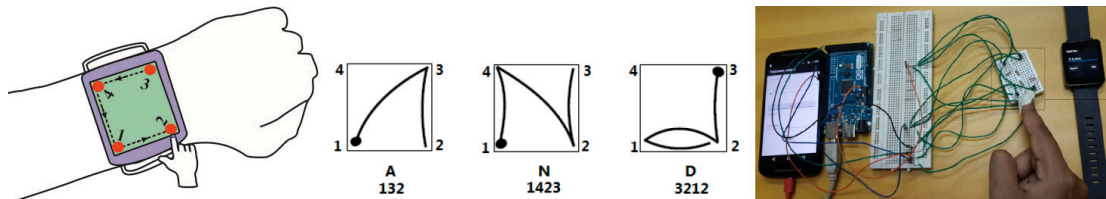


Figure 3.30: Interface de saisie de texte pour montre connectée basée sur des détecteurs à effet Hall. Illustration extraite de (Darbar *et al.*, 2016b).

bouton, il doit ensuite sélectionner le caractère par la voix. Dans le deuxième cas, les auteurs ont adopté la disposition QWERTY avec un bouton virtuel pour chaque caractère, lorsque l'utilisateur appuie grossièrement sur l'écran tactile, il doit ensuite préciser en dictant le caractère souhaité parmi les plus proches de l'appui (Lee *et al.*, 2017).

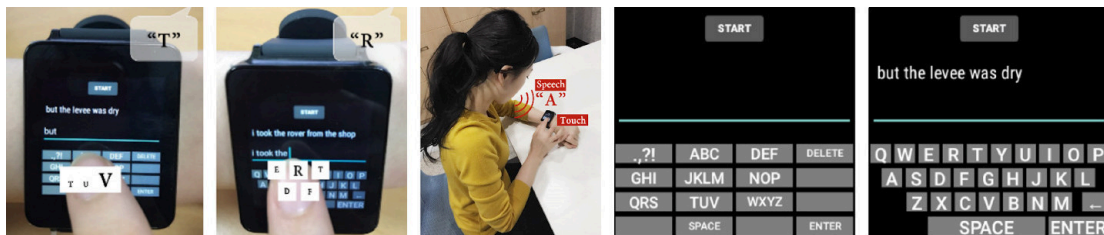


Figure 3.31: *Vouch-T*. Utilisation multimodale de la voix et du toucher. Illustration extraite de (Lee *et al.*, 2017).

WrisText est un clavier circulaire incluant la suggestion de mots et utilisant les mouvements du poignet et des doigts pour sélectionner et saisir du texte avec une seule main (Figure 3.32). Les lettres sont disposées par ordre alphabétique dans six groupes. Les mouvements circulaires du poignet permettent de choisir un groupe de caractère (basé sur la centrale inertielle) tandis que les mouvements des doigts (frottement et pincement) permettent de saisir les caractères, les supprimer ou passer dans un mode de suggestion de mots. Leur implémentation impliquait le rajout d'un détecteur de proximité sur la montre ainsi que des capteurs capacitifs

sur les doigts pour détecter leurs mouvements (Gong *et al.*, 2018).



Figure 3.32: *WrisText*. Clavier circulaire basé sur l'inclinaison du poignet. Illustration extraite de (Gong *et al.*, 2018).

SHOW (*Smart Handwriting On Watches*) est une interface de saisie de texte pour montre connectée basée sur la reconnaissance d'écriture manuscrite d'un doigt sur n'importe quelle surface horizontale (Figure 3.33). L'utilisateur fixe son coude sur la surface puis dessine les caractères avec son index. La reconnaissance automatique des caractères (l'alphabet complet, majuscule et minuscule, ainsi que l'ensemble des chiffres) s'effectue en analysant les mouvements de la montre (par la centrale inertielle) complémentés d'un système prédictif de mots. Les suggestions de mots sont présentées sous forme de boutons virtuels et l'utilisateur doit les choisir avec son autre main ou effectuer un aller-retour rotatif du poignet de la main dominante dédiée à l'écriture, celle portant la montre connectée (Lin *et al.*, 2018).



Figure 3.33: *SHOW* (*Smart Handwriting On Watches*). Écriture manuscrite sur n'importe quelle surface horizontale. Illustration extraite de (Lin *et al.*, 2018).

Nom (ou description) de l'interface, commentaire et auteur(s)	Vitesse (mpm)
<i>InclineType</i> , sensibilité à l'inclinaison (Götzelmann et Vázquez, 2015)	6,0
Alphabet phonétique simplifié (Fujiwara, 2016)	-
<i>WatchMI</i> , sensibilité à la force d'appui (Yeo <i>et al.</i> , 2016)	-
<i>EdgeWrite</i> avec des capteurs à effet Hall (Darbar <i>et al.</i> , 2016b)	3,9
<i>Vouch-T</i> , multimodalité entre la voix et le toucher (Lee <i>et al.</i> , 2017)	-
<i>WrisText</i> , clavier circulaire sensible à l'inclinaison (Gong <i>et al.</i> , 2018)	15,2
<i>SHOW</i> , écriture manuscrite (Lin <i>et al.</i> , 2018)	-

Tableau 3.4: Résumé de la sous-catégorie Capteurs non tangibles.

3.2.3 Analyse et résumé

Le tableau 3.5 présente les vitesses de saisie de texte minimum et maximum pour chacune des sous-catégories, ainsi que leurs caractéristiques principales.

Vitesse de saisie de texte (en mots par minute)		Caractéristique générale
Écran tactile		
Appui discret	6,0 - 27,2	Nécessite le regard de l'utilisateur
Appui continu	8,8 - 23,0	
Autres composants		
Tangible	3,5 - 14,7	Appareil spécifique
Non tangible	3,9 - 15,2	Contexte spécifique

Tableau 3.5: Écart des vitesses de saisie de texte et caractéristiques des sous-catégories de l'état de l'art spécifique à la saisie de texte sur montre connectée.

Bien que la comparaison de la vitesse de saisie de texte est délicate pour des raisons évoquées dans l'état de l'art général (lié notamment à la différence de

méthodologie entre chacune des études), nous percevons une tendance, avec une vitesse plus avantageuse pour la catégorie utilisant l'écran tactile.

Par ailleurs, les deux sous-catégories des travaux basés sur d'autres composants, tangibles et non tangibles, sont caractérisées par une spécificité respectivement matérielle et contextuelle. La sous-catégorie « Capteurs tangibles » est particulièrement affectée par la nécessité d'appareil spécifique non traditionnel ou personnalisé, fragile pour l'environnement industriel et non généralisable à différentes montres connectées commercialisées, par exemple en utilisant un anneau circulaire, des capteurs de pression sur les doigts ou un bracelet tactile. Une solution de la sous-catégorie « Capteurs non tangibles » subit cette même contrainte matérielle (celle requérant l'ajout de multiple capteurs à effet Hall et un aimant sur le doigt de l'utilisateur), les autres sont soit basées sur la centrale inertielle ou le microphone déjà présent sur de nombreuses montres connectées traditionnelles. Cependant, cette sous-catégorie est souvent restreinte à des contextes spécifiques, par exemple, pour des solutions utilisant le microphone, un environnement ni bruyant ni demandant d'être discret et pour celles utilisant la centrale inertielle, une posture quasi statique verticale (debout ou assis) sous peine de sensiblement modifier la reconnaissance de l'orientation et inclinaison du poignet.

Bien qu'avantageux pour leur vitesse de saisie de texte, les travaux de la catégorie « Écran tactile » ne sont pas dépourvus d'inconvénients pour autant. En particulier, la sous-catégorie des appuis discrets est caractérisée par la constante nécessité du regard de l'utilisateur vers la montre, plus précisément, l'écran tactile. En effet, de par la taille réduite de ce dernier (et par conséquent de celle des boutons virtuels), il n'est pas raisonnable d'appuyer sur l'écran tactile de la montre sans porter son regard vers sa main manipulant l'objet. Même parmi la sous-catégorie des appuis continus, seules deux solutions permettent de saisir du texte sans avoir à regarder l'écran tactile de la montre : *SwipeBoard* (enchaînement de deux ges-

tuelles, glissements unidirectionnels ; 9,1 mots par minute pour des novices puis 19,6 avec 2 heures d'entraînement) et *DragKeys* (une seule gestuelle de glissement, pouvant être multidirectionnel ; aucune vitesse rapportée), mais autant l'une que l'autre nécessite de connaître la disposition des caractères et ont considéré la saisie de chiffres comme secondaire (nécessitant des actions supplémentaires brièvement décrites et non étudiées).

Enfin, aucune des précédentes recherches ne s'est positionnée dans le contexte industriel, les auteurs ont présenté leur interface indépendamment des contraintes d'un contexte particulier, le plus souvent en expérimentant avec des participants immobiles et assis.

3.3 Critères et considérations de conception de l'interface ControlWear

L'interface ControlWear est basée sur l'usage de la montre connectée pour saisir du texte sur un visiocasque de réalité augmentée et non sur la montre en elle-même. Avec cette différence vis-à-vis de celles présentées dans l'état de l'art, les contraintes de conception peuvent légèrement varier (avantageusement ou non). À cet égard, nous avons établi différents critères de conception de ControlWear basés autant sur l'état de l'art général et spécifique que sur notre expérience, les résultats de l'étude préliminaire et les requis du partenaire et contexte d'usage industriel :

- Espace visuel réduit. Pour des raisons de sécurité liées au contexte industriel, où l'environnement est propice aux aléas (tel que la présence de tuyaux traversant des chemins de passage), nous estimons que l'interface de saisie de texte doit limiter (minimiser) l'espace visuel requis, et ainsi éviter les occlusions inappropriées (par exemple, des objets réels cachés par du contenu virtuel présenté avec le visiocasque de réalité augmentée).

- Liberté du regard. Pour des raisons similaires, nous estimons que l'interface de saisie de texte ne doit pas obliger l'utilisateur à concentrer son regard sur un centre d'intérêt précis (par exemple sur la montre connectée) afin d'être alerte par rapport à son environnement.
- Liberté de posture et des mains. Pour des raisons liées aux potentiels cas applicatifs étudiés avec le partenaire industriel, les utilisateurs peuvent être amenés à adopter des postures peu communes (couché, penché) ou utiliser couramment de nombreux outils occupants leurs mains, nous estimons qu'ils doivent pouvoir utiliser l'interface de saisie de texte indifféremment de la position de leur corps ou de l'occupation de leurs mains.
- Apprentissage réduit (proche d'inexistant). L'interface de saisie de texte peut être utilisée par de nombreuses personnes pendant un court laps de temps (dû à une rotation et un renouvellement des effectifs importants), par conséquent cette dernière doit privilégier un apprentissage réduit, voire inexistant, pour être rapidement efficace.
- Ne pas utiliser de matériel spécifique avec une solution orientée logicielle et fonctionnelle sur des appareils déjà commercialisés et éprouvés afin d'accélérer l'implémentation en production de la solution par le partenaire industriel.
- Les techniques de désambiguïsation des caractères ou de suggestion de mots basées sur le vocabulaire doivent rester optionnelles, car le vocabulaire professionnel est très spécifique, peu courant et le texte saisi implique souvent des noms de code avec des chiffres (inadaptés aux calculs de fréquences des mots d'une langue).

3.4 Implémentation

Nous avons choisi d'utiliser des montres connectées car ce sont des appareils à portée de main, sans pour autant les occuper. Les mains libres des utilisateurs permettent par exemple de tenir des outils ou de prendre appui sur l'environnement.

Nous avons choisi d'utiliser des montres connectées traditionnelles déjà commercialisées pour bénéficier d'un matériel professionnel robuste.

Nous avons choisi d'exploiter l'écran tactile des montres connectées traditionnelles, car ce composant est standardisé et permet d'adopter des interactions facilement distinguables (contact du doigt ou non), discrètes, non fatigantes et familières avec l'usage d'appareils démocratisés (téléphones intelligents et tablettes).

Nous avons choisi d'exploiter l'écriture manuscrite (caractère par caractère) car elle est maîtrisée par les utilisateurs, minimisant le processus d'apprentissage et permettant de libérer le regard de l'utilisateur (Goldberg et Richardson, 1993).

Nous avons choisi d'implémenter en supplément un clavier virtuel traditionnel exploitable en combinant un usage simplifié de la montre connectée avec les mouvements de la tête pour des raisons comparatives.

Cette section présente d'abord les interfaces et l'architecture de ControlWear puis décrit la reconnaissance automatique des caractères.

3.4.1 Interfaces et architecture

L'interface ControlWear inclut deux techniques de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée :

- *Montre*, technique principale de l'interface ControlWear, appelée ainsi car la saisie de texte est basée sur l'usage de la montre connectée. La montre connectée « écoute » en permanence les événements de l'écran tactile, l'uti-

lisateur peut saisir du texte en traçant les caractères sur ce dernier, un retour visuel de l'écran tactile de la montre et du tracé est présent sur le visiocasque de réalité augmentée.

- *Mixte*, technique secondaire de l'interface ControlWear, appelée ainsi car multimodale, l'utilisateur doit combiner l'usage de la tête et de la montre. Un clavier virtuel traditionnel flottant et un curseur virtuel basé sur les mouvements de la tête permettent de sélectionner un caractère, ce dernier est saisi en effectuant un appui simple (court et fixe) sur l'écran tactile de la montre connectée. Cette technique fut implémentée avec comme objectif de proposer une utilisation simplifiée et imprécise de la montre connectée. Une interface implémentée par défaut avec le visiocasque HoloLens (1^{ère} génération) de Microsoft est proche de cette technique *Mixte*, mais l'utilisateur doit porter et utiliser une manette spécifique pourvue d'un seul bouton, à la place d'une montre connectée.

L'architecture prototypale de l'interface ControlWear implique l'utilisation de 3 appareils mobiles (dont deux portés) : une montre connectée et un visiocasque de réalité augmentée, mais aussi un téléphone intelligent (Figure 3.34).

La montre connectée reçoit les informations de l'utilisateur lorsqu'un doigt est en contact avec l'écran, les coordonnées sont envoyées au téléphone intelligent par réseau Bluetooth (2,4 GHz) afin d'être renvoyées au visiocasque de réalité augmentée par réseau WiFi (5 GHz, pour éviter les potentiels conflits de fréquence identique). Dans le cas présent, le téléphone intelligent fait seulement office de passerelle d'informations, sa présence est optionnelle (la montre connectée pourrait envoyer les informations directement au visiocasque), mais nous la justifions (par anticipation) pour son potentiel (1) à traiter des informations plus rapidement que les deux autres appareils (avec des performances supérieures aux objets portés) et

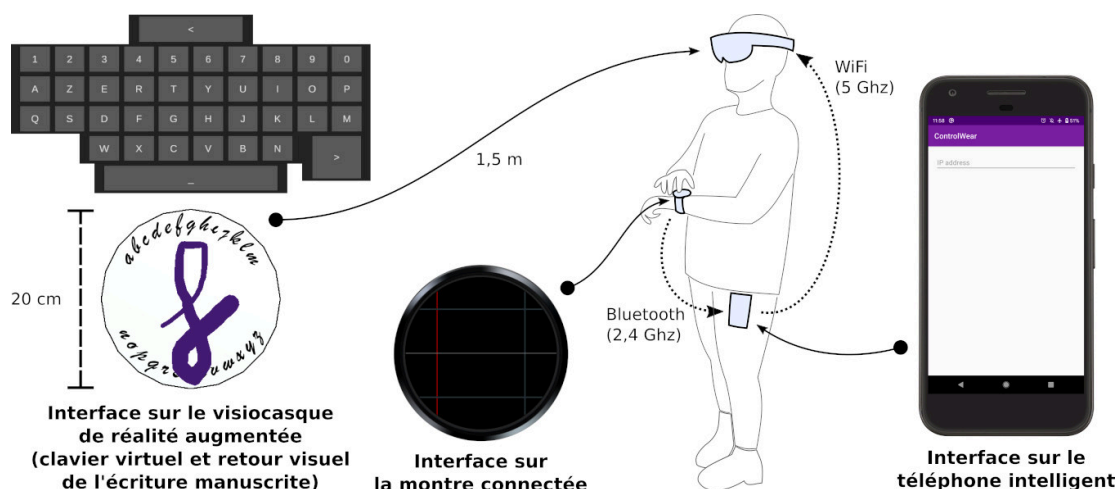


Figure 3.34: Interfaces et communications entre les différents appareils de l'implémentation de ControlWear.

(2) à ajouter des capteurs au système informatique dans son ensemble (tel qu'un accès internet).

L'implémentation logicielle de ControlWear est double (Figure 3.35) avec une partie dédiée à la montre connectée et au téléphone intelligent prenant la forme d'applications conçues avec Android Studio, et une autre partie dédiée au visiocasque de réalité augmentée prenant la forme d'un module (*package*) conçu avec et pour Unity (une plateforme de développement 3D en temps réel, couramment utilisé dans des domaines comme l'architecture, la construction et l'ingénierie).

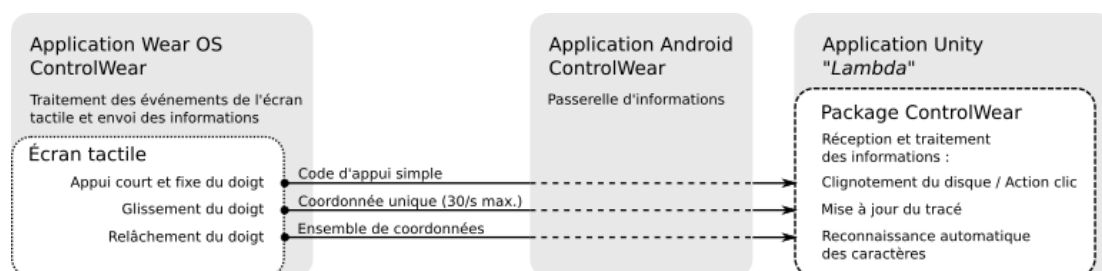


Figure 3.35: Architecture logicielle, comportement et communication de ControlWear.

L'application Wear OS (anciennement Android Wear) écoute les événements perçus par l'écran tactile de la montre connectée : chaque fois que le doigt d'un utilisateur entre en contact, se déplace ou relâche l'écran, l'application convertit et enregistre l'information en coordonnée (X, Y) variant entre 0 et 100 (indépendamment de la taille de l'écran) environ 60 fois par seconde, mais ne l'envoie au téléphone que 30 fois par seconde (valeur définie empiriquement pour éviter de surcharger la communication et ainsi créer des saccades visuelles). Pour ne pas perdre les informations non envoyées, lorsque le doigt relâche l'écran, l'ensemble des informations (suite de coordonnées) enregistrées pendant son mouvement est aussi envoyé au téléphone. L'interface de la montre connectée est essentiellement noire (pour minimiser la consommation de l'écran) avec seulement 4 lignes horizontales et verticales pour aider le tracé des caractères si besoin (Figure 3.34). Pour autant, l'aide est volontairement minime, il n'y a aucun retour visuel du tracé du doigt sur l'écran tactile afin d'éviter d'attirer le regard des utilisateurs sur la montre connectée. De base, l'interface de l'application dédiée au téléphone intelligent permet seulement de saisir l'adresse IP ⁷ du visiocasque de réalité augmentée afin de pouvoir lui envoyer aussitôt les informations reçues de la montre connectée.

Le module Unity dédié au visiocasque de réalité augmentée peut s'intégrer à n'importe quelle application conçue avec Unity (nommé *Lambda* sur la Figure 3.35). Le module simplifie (pour les développeurs d'applications) l'intégration de l'interface ControlWear, que ce soit pour la réception et le traitement des informations (reconnaissance automatique des caractères) ou pour la gestion de l'interface visuelle. Le retour visuel de la montre sur le visiocasque de réalité augmentée est représenté par un disque (similaire à l'écran tactile) placé virtuellement à 1,5 m

7. Code d'identification d'un périphérique connecté à un réseau informatique utilisant le protocole internet (IP) pour communiquer.

de l'utilisateur, flottant dans son champ de vision et mesurant 20 cm de diamètre lorsqu'il est le seul retour visuel (pour l'interface *Montre*) ou 10 cm lorsqu'il est accompagné du clavier virtuel (pour l'interface *Mixte*). Les caractéristiques du clavier virtuel sont inspirées de celui déjà implémenté par défaut sur le visiocasque de réalité augmentée, mais présente une disposition des caractères AZERTY⁸ et mesure 58,2 cm de large par 28,8 cm de hauteur, placée à 1,5 mètre de l'utilisateur. Chaque touche du clavier virtuel mesure 48 x 40 mm, espacé de 8 mm horizontalement et verticalement (Figure 3.34). Les touches du clavier virtuel changent de couleur lorsqu'elles sont sélectionnées ou activées. Les deux éléments virtuels, autant le disque que le clavier, suivent l'orientation de la tête avec respectivement 5 et 15 degrés de liberté, de manière à toujours être présent dans le champ de vision de l'utilisateur.

Il y a trois sortes d'informations échangées entre les appareils :

1. Un code pour signaler un simple appui sur la montre, dans ce cas le retour visuel entier (le disque) clignote (fondu aller-retour entre deux couleurs en 250 ms) et une action de clic est simulée sur l'application Unity (le visiocasque).
2. Une mise à jour des coordonnées (signalant un déplacement du doigt sur l'écran tactile), permettant ainsi de tracer le dessin en temps réel.
3. Un ensemble de coordonnées (incluant cette fois celles non envoyées par les mises à jour), signalant la fin du tracé (relâchement du doigt), celui-ci disparaît (fondu de transparence en 250 ms) et l'information est traitée par l'algorithme de reconnaissance des caractères.

8. Variante de la disposition QWERTY, principalement utilisée en France et en Belgique.

3.4.2 Reconnaissance automatique des caractères

La reconnaissance automatique des caractères est un domaine de recherche à part entière et les perspectives de nos travaux n'ont pas vocation à améliorer la technique mais à l'utiliser. Nous avons choisi d'implémenter la reconnaissance des caractères à l'aide de l'algorithme $\$Q$ (Vatavu *et al.*, 2018), pour deux raisons :

- Il appartient à une famille d'algorithmes ($\$-family$) de reconnaissance des gestes (bidimensionnels) conçus pour le prototypage rapide d'interface utilisateur, en particulier pour être implémenté par ceux dont les principales préoccupations sont l'interactivité.
- $\$Q$ est le dernier algorithme de cette famille et est spécifiquement dédié aux appareils mobiles et portables, tels qu'une montre connectée ou un visiocasque de réalité augmentée.
- Une ancienne version de l'algorithme, $\$N$, fut utilisée avec succès pour l'implémentation d'une interface basée sur la reconnaissance des caractères manuscrits dessinés avec un doigt sur la paume de la main opposée (Wang *et al.*, 2015b). Les auteurs rapportent un taux de reconnaissance atteignant 98 % (cependant, en l'ayant mesuré uniquement avec un jeu de caractères réduit à 14 modèles).

Cet algorithme est une forme de *méthode des k plus proches voisins* utilisant une fonction euclidienne pour mesurer la distance entre un nouveau geste (celui venant d'être réalisé par l'utilisateur) avec ceux en mémoire préalablement enregistrés. En termes d'apprentissage artificiel, cet algorithme appartient à la famille d'apprentissage à base de modèles (d'instances ou d'exemples) et supervisé, car les modèles fournis sont étiquetés (définis).

Pour notre reconnaissance automatique de caractères, un geste représente le dessin (tracé) du caractère et son étiquette est le code (tel que le nom) du caractère.

Le dessin correspond à une succession de points, chacun défini avec des coordonnées X , Y sur un plan euclidien. Pour minimiser les contraintes d'écriture, la reconnaissance automatique n'est pas restrictive sur la taille et le sens du tracé, le caractère peut être dessiné plus ou moins grand, en partant autant d'un côté que de l'autre et en repassant plusieurs fois sur un trait. Néanmoins, la reconnaissance est sensible à l'orientation du caractère. La segmentation des caractères (différence entre un caractère et le suivant/précédent) s'opère en relâchant le doigt de l'écran tactile, ainsi, chaque caractère doit être saisi un à un, avec un seul trait.

Il existe plusieurs ensembles de données composés des différents caractères nécessaires à la saisie de texte (alphabet et chiffres). Cependant, les informations disponibles ne sont pas adaptées à notre implémentation de ControlWear (par exemple, les caractères sont présentés sous forme d'images ou ont été saisis avec plusieurs traits), ainsi nous avons créé en interne nos modèles (exemples étiquetés) des caractères. Les modèles (présentés sur la Figure 3.36) sont basés sur une écriture proche du style cursive en minuscule pour minimiser le nombre de caractères nécessitant habituellement plusieurs traits, les points des lettres "i" et "j" étaient ignorés. Chaque caractère a été dessiné (sur la montre) et enregistré environ 15 fois (plus ou moins 1) par un utilisateur, cela comprend l'ensemble des lettres de l'alphabet, les chiffres et trois symboles similaires à des flèches pointant vers la droite, la gauche et en bas (représentant respectivement l'espace, la correction et la validation), soit 571 modèles au total pour 39 caractères. Les modèles ont été testés de manière informelle à l'oral avec un autre utilisateur, en demandant de réussir à saisir au moins une fois chaque modèle.

a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z

Figure 3.36: Modèle des lettres de l'alphabet.

3.5 Étude utilisateurs 1 : *in situ*

Le but de cette étude utilisateurs est d’explorer et mesurer les performances des deux techniques (*Montre* et *Mixte*) de l’interface ControlWear dans un environnement industriel, puis de les comparer à deux autres interfaces référentielles⁹ de saisie de texte sur un outil d’aide informatique dédié à une tâche d’inspection. Le plan expérimental de l’étude était intra-sujets avec une seule variable indépendante, l’interface, dans quatre conditions : *Montre*, *Mixte*, *Visiocasque* et *Tablette*. Les variables dépendantes étaient la vitesse de saisie de texte (en mots par minute), le nombre de frappes par caractère, la vitesse d’exécution de la tâche, la charge de travail (avec la méthode NASA-TLX), l’utilisabilité (avec la méthode SUS) et l’expérience utilisateur (avec la méthode AttrakDiff).

3.5.1 Participants

Huit participants (4 femmes, 4 hommes ; entre 22 et 54 ans, moyenne 36,6 ; écart-type = 12) ont été recrutés parmi le personnel de SOCOTEC (entreprise spécialisée dans la maîtrise et gestion des risques). Tous les participants sont des techniciens expérimentés (entre 2,5 et 10 ans d’expérience, moyenne : 6,2 ; écart-type : 2,6) et ont déjà manipulé (entre 2 et 4 mois) l’outil informatique d’aide à l’inspection utilisé pour cette étude (une version sur tablette). Tous les participants ont donné leur consentement et ont participé à l’étude pendant leurs heures de travail, ils n’ont pas reçu de compensation financière pour leur participation.

9. Nous qualifions de référentielles les interfaces qui sont déjà implémentées et étudiées par la communauté scientifique.

3.5.2 Matériel

Le matériel de cette étude (Figure 3.37) comprenait une tablette Android (Samsung Galaxy Tab 2), un téléphone intelligent Android (Google Pixel), une montre connectée Wear OS (Fossil Sport) et un visiocasque de réalité augmentée (Microsoft HoloLens, 1^{ère} génération). La montre connectée était portée sur le poignet de la main non dominante. Outre les appareils technologiques, les participants portaient aussi leur équipement habituel : un casque de chantier avec des lunettes de protection (rétractable), une paire de gants de protection dédiée aux écrans tactiles, une sacoche et un miroir télescopique.



Figure 3.37: Visiocasque de réalité augmentée Microsoft HoloLens, montre connectée Fossil Sport, tablette Galaxy Tab 2 et téléphone intelligent Google Pixel.

3.5.3 Logiciel

L'outil informatique d'aide à l'inspection originelle, appelé SoTech a été conçu avec Unity par le partenaire industriel OHRIZON pour l'entreprise SOCOTEC. SoTech fonctionne sur tablette (Android) et était en production depuis plus de 4 mois avant cette étude utilisateurs. SoTech permet d'assister les techniciens de SOCOTEC dans leur tâche d'inspection et contrôle, notamment pour le suivi de leurs travaux. Par exemple, pour contrôler l'étanchéité des traversées (tel qu'un

tuyau d'eau) entre les différentes salles d'une centrale nucléaire, l'outil propose aux techniciens une série de questions de validation, incluant des prises de photos, afin d'assurer le respect et suivi des procédures de contrôle. Pour l'étude utilisateurs, nous avons porté SoTech sur un visiocasque de réalité augmentée, l'interface a été légèrement adaptée pour être compatible autant avec la tablette qu'avec le visiocasque de réalité augmentée, ceci inclut notamment des changements de couleurs (moins vives), de contraste et de dimensions (agrandissement) des différents éléments visuels tels que les boutons, liste, champs de texte et fonds (Figure 3.38). Les modifications n'ont pas affecté le processus fonctionnel de SoTech afin de maximiser le transfert de connaissance des techniciens vers le nouvel outil.

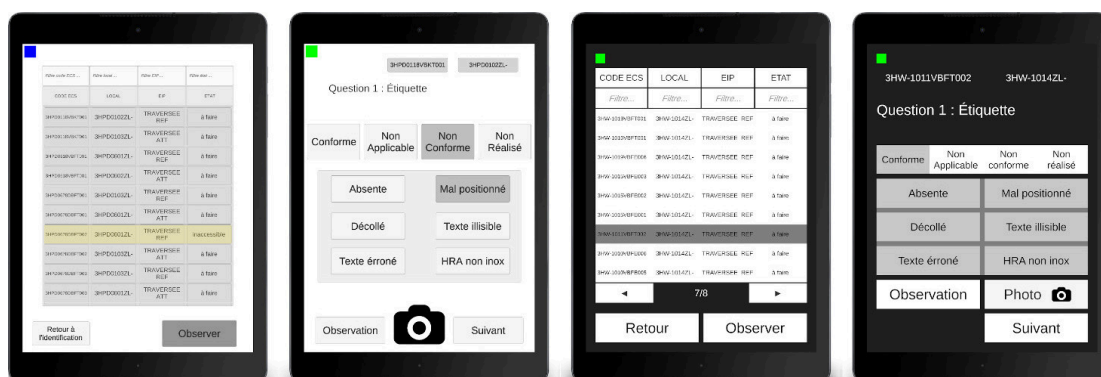


Figure 3.38: Mise à jour de l'interface visuelle (de la version sur tablette) pour qu'elle soit adaptée au visiocasque de réalité augmentée (gauche anciennes, droite nouvelles).

L'interface visuelle pour le visiocasque de réalité augmentée était identique, prenant la forme d'une fenêtre virtuelle flottante de 51,2 cm de hauteur et 38,4 cm de large, positionnée à 1,80 m de distance (Figure 3.39, gauche). La fenêtre virtuelle flottante suit l'orientation de la tête avec 25 degrés de liberté, offrant aux utilisateurs la possibilité de positionner la fenêtre à la périphérie du champ de vision, sans jamais la perdre complètement.

ControlWear a été intégré à l'outil SoTech (dans sa version dédiée au visiocasque

de réalité augmentée) pour permettre d’interagir avec la montre connectée (Figure 3.40). ControlWear permettait de saisir du texte (fonction principale), mais aussi d’effectuer une action virtuelle (avec un appui simple sur l’écran tactile de la montre connectée) pour interagir avec les boutons virtuels et autres éléments de l’outil SoTech. Cette version expérimentale de l’outil inclut aussi des enregistrements automatiques d’interactions dans des traces (notamment pour réaliser des analyses et calculer les vitesses de saisie de texte et d’exécution des tâches).

Une application mobile (Figure 3.39, droite) dédiée à l'étude utilisateurs permettait de contrôler les conditions du facteur interface et d'affecter des identifiants aux participants. Cette application intégrait aussi la partie mobile de Control-Wear (passerelle d'informations) et proposait un espace interactif pour simuler l'usage de la montre connectée dans le cas où cette dernière cesserait de fonctionner (le téléphone intelligent serait fixé au poignet), mais cette situation n'est jamais arrivée.

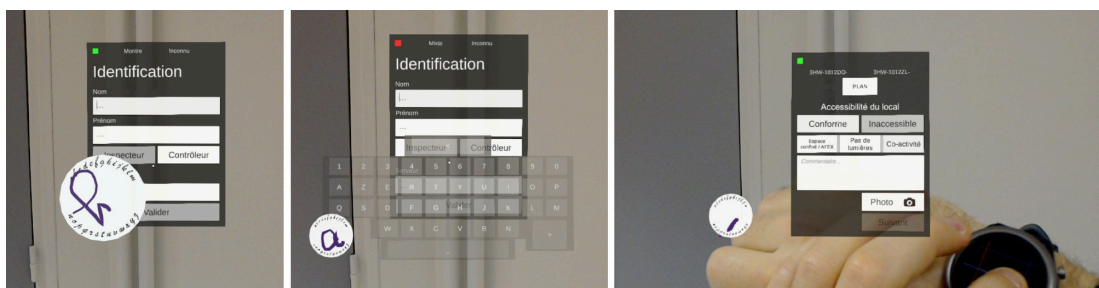


Figure 3.40: Interface ControlWear intégrée à l'application SoTech sur visiocasque de réalité augmentée, de gauche à droite : technique *Montre*, *Mixte* et *Mixte* hors saisie de texte, lors d'une simple interaction avec un bouton virtuel.

3.5.3.1 Interfaces référentielles

En plus des deux techniques de saisie de l'interface ControlWear, *Montre* et *Mixte*, nous avons exploré et étendu les comparaisons avec deux interfaces référentielles :

- *Visiocasque*, nommée ainsi, car cette interface utilise uniquement le visiocasque de réalité augmentée, elle est similaire à celle implémentée par défaut avec le visiocasque HoloLens (1^{ère} génération) de Microsoft et reste par conséquent proche de la technique *Mixte* de l'interface ControlWear. Un clavier virtuel traditionnel flottant et un curseur virtuel basé sur les mouvements de la tête permettent de sélectionner un caractère, ce dernier est saisi en effectuant un geste de la main en l'air (l'équivalent d'un pincement-relâchement de doigts, tel que le pouce et l'index). Le clavier virtuel a les mêmes caractéristiques que celui implémenté pour la technique *Mixte* de l'interface ControlWear.
- *Tablette*, nommée ainsi, car cette interface utilise uniquement la tablette et un clavier virtuel standard (implémenté par défaut) incluant notamment la suggestion de mots pour la saisie du texte.

3.5.4 Tâche

En production, l'outil SoTech offrait une liste des points d'intérêt à inspecter avec leur code de lieu et repérage unique puis les techniciens devaient les trouver. Pour l'étude expérimentale, l'instructeur montrait trois points d'intérêt aux participants et ces derniers devaient ensuite les rechercher dans la liste, puis lancer le processus d'inspection qui impliquait une première série de 3 questions suivie d'une prise de photo obligatoire puis d'une deuxième série de 10 questions. Des commentaires et photos additionnels pouvaient être saisis pour chaque question. Une tâche d'inspection impliquait au minimum (hors saisie de texte) 30 interactions (tel que des appuis de boutons virtuels) pour naviguer à travers le processus d'inspection.

3.5.5 Procédure

L'étude utilisateurs s'est déroulée dans un environnement bruyant d'une salle sans contrainte d'espace, sur le chantier du nouveau réacteur de la centrale nucléaire de Flamanville (France). Après avoir individuellement accueilli les participants puis présenté le but de l'expérimentation, nous leur demandions de réaliser une série de trois tâches d'inspection avec la tablette puis avec les trois interfaces du visiocasque. La série de tâches a été définie avec un expert de l'entreprise SOCOTEC pour représenter une séquence typique du travail d'inspection des techniciens. Nous requérions des participants qu'ils écrivent au minimum un commentaire libre sur l'une des tâches et qu'ils gardent ce même commentaire pour chacune des interfaces. Les participants commençaient toujours par l'interface référentielle *Tablette*, puis l'ordre était contrebalancé soit en continuant avec l'interface référentielle *Visiocasque* soit avec la technique *Montre* de l'interface ControlWear (les deux étaient toujours utilisés), pour toujours finir avec la technique *Mixte* de l'in-

terface ControlWear (Figure 3.41). Lorsque les participants effectuaient leur série de tâches avec la technique *Mixte*, ils avaient aussi la liberté d'utiliser simultanément l'autre technique *Montre* et l'interface référentielle *Visiocasque*.

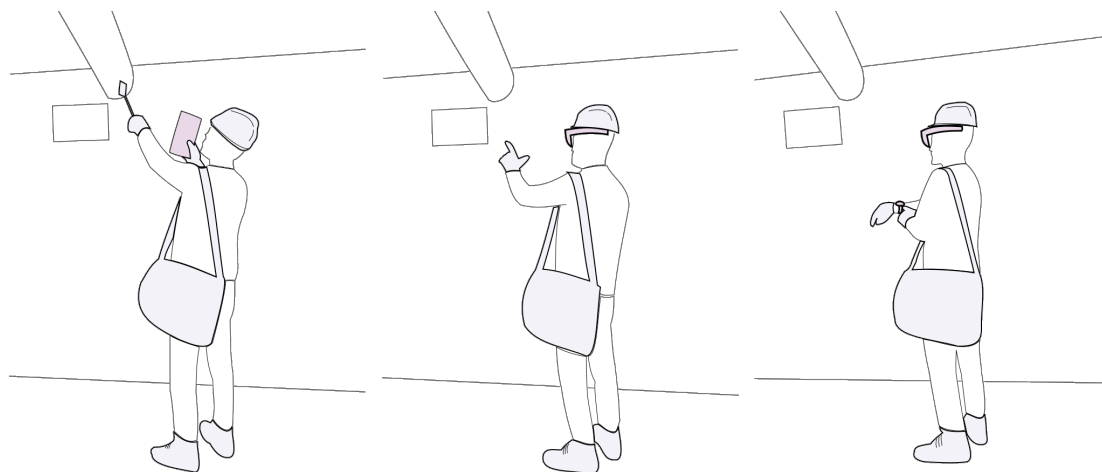


Figure 3.41: Utilisation de la tablette, du visiocasque de réalité augmentée et de la montre connectée pour l'inspection de traversées.

Pour chaque interface, y compris *Tablette*, directement après avoir effectué la tâche, nous leur demandions de répondre aux questionnaires NASA-TLX (Annexe C.2), SUS (Annexe C.1) et AttrakDiff en version allégée (Annexe C.3). Avant de commencer les séries de tâches d'inspection utilisant le visiocasque, l'instructeur s'assurait que les participants se familiarisaient avec les interactions de gestuelles des mains en l'air (nécessaire pour l'interface Visiocasque) en naviguant dans le menu principal du visiocasque de réalité augmentée. Après avoir réalisé l'ensemble des tâches avec toutes les interfaces, les participants devaient répondre à un questionnaire (Annexe D.2) afin de récolter des informations démographiques, un classement des interfaces par préférence et des remarques. De plus, l'instructeur observait l'ensemble des accomplissements des tâches par les participants et prenait note des remarques faites à voix haute par ces derniers. Au total, l'expérimentation a duré environ 105 minutes par participant.

3.5.6 Résultats

L'ensemble des résultats provient des questionnaires, des traces et des notes de l'instructeur.

Pour rappel, les formules de vitesse de saisie de texte et du nombre de frappes par caractère ainsi que les méthodes pour mesurer la charge de travail et l'utilisabilité (NASA-TLX et SUS) sont présentées au début de l'état de l'art, partie 2.1.

3.5.6.1 Vitesse de saisie de texte

La vitesse de saisie de texte et le nombre de frappes par caractère s'appliquent sur les champs de texte dédiés aux identifiants, aux commentaires et aux filtres de recherche, soit un total de 1816 actions de saisie de caractères en incluant les corrections (environ 227 par participant).

Une analyse de variance a montré que le facteur interface a un effet significatif sur la vitesse de saisie de texte ($F_{3,28} = 52,846; p < 0,05$). Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a été effectuée pour déterminer qu'il y avait des effets significatifs entre toutes les interfaces, excepté entre *Visiocasque* et *Mixte* ($p = 0,328$). L'interface *Tablette* obtient une vitesse moyenne de 19,39 mots par minute (écart-type = 6,03), tandis que les interfaces *Visiocasque* et *Mixte* obtiennent respectivement 4,04 (écart-type = 1,48) et 4,63 (écart-type = 0,78) mots par minute. L'interface *Montre* a présenté des difficultés à reconnaître les caractères des participants et obtient seulement une moyenne de 1,25 (écart-type = 1,14) mots par minute.

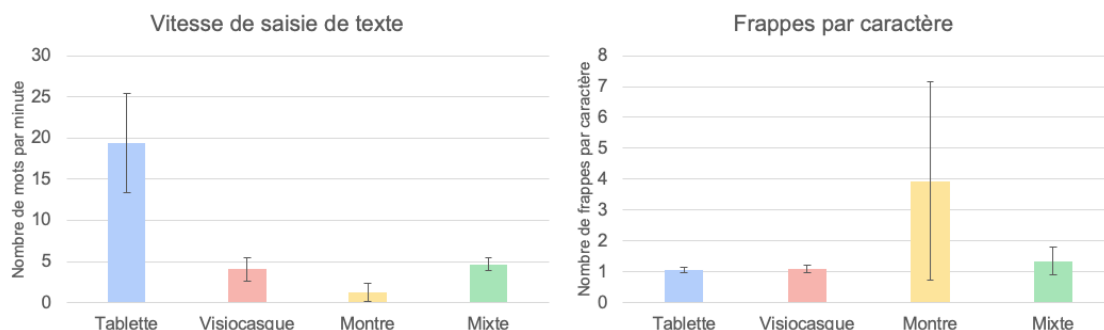


Figure 3.42: Vitesse moyenne de saisie de texte en mots par minute pour chaque interface (gauche) et nombre de frappes moyen par caractère pour chaque interface (droite).

3.5.6.2 Nombre de frappes par caractère

Pour la saisie de texte avec l'interface *Montre*, nous considérons le dessin d'un caractère comme une frappe. Pour toutes les interfaces impliquant le visiocasque (*Visiocasque*, *Montre* et *Mixte*), chaque frappe correspond à 1 seul caractère, ainsi le meilleur score du nombre de frappes par caractère est 1,0 puis augmente lorsqu'une erreur est saisie et corrigée. *A contrario*, l'interface référentielle *Tablette*, inclut la suggestion et saisie de mots complets, ainsi son nombre de frappes par caractère peut être inférieur à 1,0.

Une analyse de variance montre que le facteur interface a un effet significatif sur le nombre de frappes par caractère ($F_{3,28} = 5,907; p < 0,05$). Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a été effectuée pour déterminer qu'il y avait des effets significatifs uniquement entre l'interface *Montre* et chacune des autres interfaces ($p < 0,05$). La moyenne du nombre de frappes par caractère de l'interface *Montre* est 3,94 (écart-type = 3,21) tandis que celle des interfaces *Tablette*, *Visiocasque* et *Mixte* est relativement similaire avec respectivement 1,07 (écart-type = 0,09), 1,10 (écart-type = 0,13) et 1,35 (écart-type = 0,44).

3.5.6.3 Vitesse d'exécution d'une tâche d'inspection

La vitesse d'exécution d'une tâche est calculée à partir des traces puis rapportée en secondes sur la Figure 3.43. Les participants n'ont pas entièrement respecté la règle de saisie du même texte pour chacune des interfaces, par conséquent, nous avons aussi inclus la vitesse d'exécution d'une tâche en omettant les actions nécessaires à la saisie de texte.

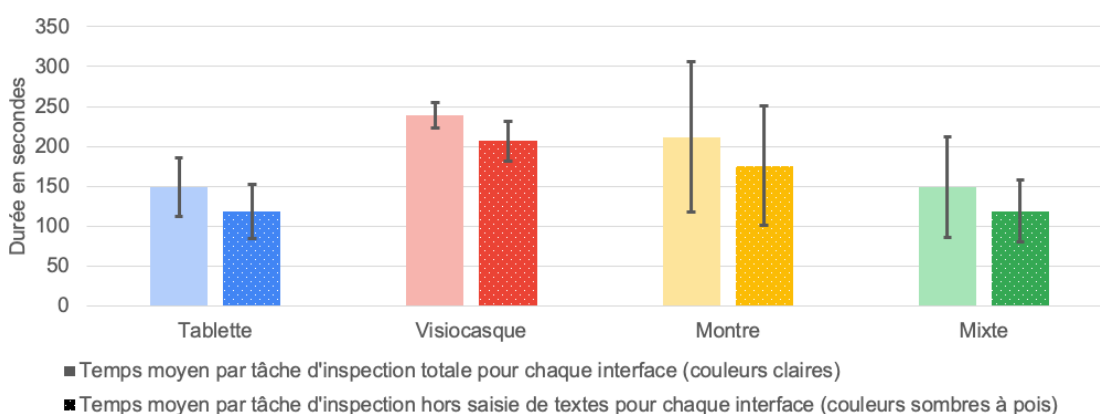


Figure 3.43: Temps moyen en secondes pour effectuer une tâche d'inspection (avec et hors saisie de textes) pour chacune des interfaces.

Une analyse de variance montre que le facteur interface a un effet significatif autant sur la vitesse d'exécution de tâche d'inspection totale ($F_{3,28} = 4,585, p < 0,05$) que sur celle hors saisie de textes ($F_{3,28} = 6,790, p < 0,05$). Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a montré qu'il y avait des effets significatifs uniquement entre les interfaces *Tablette* et *Visiocasque* ($p < 0,05$) puis *Mixte* et *Visiocasque* ($p < 0,05$). Les moyennes de la vitesse d'exécution d'une tâche (hors saisie de texte) des interfaces *Mixte* et *Tablette* sont similaires avec tous deux 119 secondes (écart-type respectif 34 et 39 secondes) tandis que celle de l'interface *Visiocasque* est 207 secondes (écart-type = 25) puis 176 secondes pour l'interface *Montre* (écart-type = 75).

3.5.6.4 Charge de travail

La charge de travail induite des interfaces perçue par les participants a été mesurée avec la méthode NASA-TLX (Annexe C.2). Nous rapportons les résultats avec le score final (brut) et par dimensions sur la Figure 3.44, un score bas est désiré et indique une faible charge de travail. L'interface référentielle *Tablette* présente un index de charge de travail (moyenne = 20,52; écart-type = 8,25) 38,6 %, 51,5 % et 56,4 % inférieur à celui des interfaces respectives *Mixte* (moyenne = 33,44; écart-type = 21,85), *Visiocasque* (moyenne = 42,29; écart-type = 23,47) et *Montre* (moyenne = 47,08; écart-type = 20,40), avec un écart accentué pour les dimensions concernant la performance et la frustration perçue puis l'effort fourni.

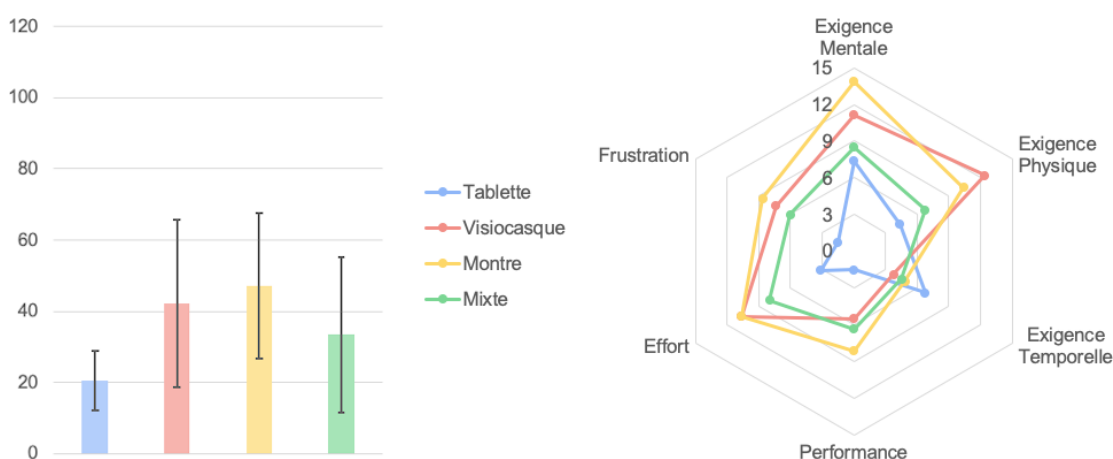


Figure 3.44: Moyenne des scores bruts du NASA-TLX et de ses dimensions par interface.

3.5.6.5 Utilisabilité

L'utilisabilité a été mesurée avec le questionnaire SUS (Annexe C.1), le score varie entre 0 et 100, un score élevé est désirable. La Figure 3.45 présente les scores moyens accompagnés de leur signification pour chacune des interfaces. L'interface référentielle *Tablette* obtient un score de 89,69 (écart-type = 11,14), soit 16,67

%, 29,3 % et 29,9 % de plus que les interfaces respectives *Mixte* (moyenne = 76,88; écart-type = 23,63), *Visiocasque* (moyenne = 69,38; écart-type = 21,45) et *Montre* (moyenne = 69,06; écart-type = 19,55). Contrairement aux interfaces *Montre* et *Visiocasque*, les interfaces *Tablette* et *Mixte* ont atteint la plage Acceptable (avec un score supérieur à 70), étant respectivement considérées comme Excellent et Bon. Le score avantageux de la *Tablette* vis-à-vis de l'interface *Mixte* est cohérent avec une précédente étude signalant que les appareils génériques, due à leur familiarité, devraient recevoir un score d'environ 15 à 16 % supérieur aux nouveaux prototypes testés (Kortum et Bangor, 2013).

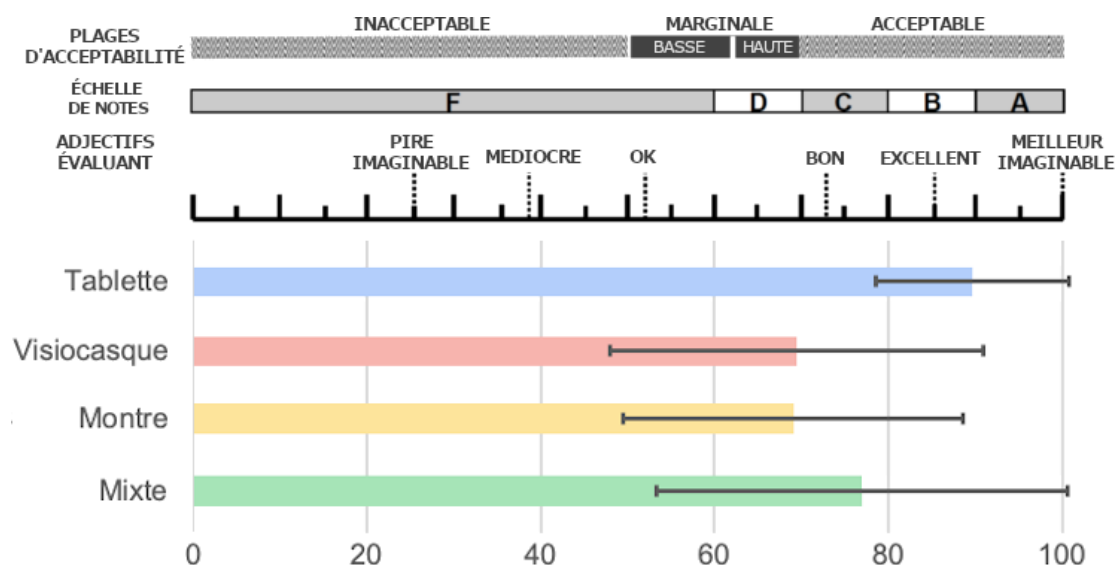


Figure 3.45: Moyenne des scores du SUS par interface avec les marges d'acceptabilité et adjectifs qualificatifs, notre traduction (Bangor *et al.*, 2009).

3.5.6.6 Expérience Utilisateur

L'expérience utilisateur est proche de l'utilisabilité, mais se diffère en incluant notamment la perception, le ressenti et les émotions perçues par l'utilisateur avec l'interface. L'expérience utilisateur a été mesurée par l'intermédiaire du question-

naire AttrakDiff (Annexe C.3) dans sa version officiellement allégée constituée de 10 questions (Hassenzahl *et al.*, 2003). Nous avons utilisé une version traduite et validée en Français (Lallemand *et al.*, 2015). Les questions sont regroupées dans 4 dimensions (variant entre -3 et 3) : les qualités pragmatiques, les qualités hédoniques de stimulation et d'identité puis l'attractivité globale. Un score positif et élevé est désirable. Les scores par dimension pour chaque interface sont rapportés sur la Figure 3.46. Bien que nous considérons la qualité pragmatique comme la plus importante pour une tâche d'inspection nucléaire, les utilisateurs restent néanmoins des humains avec des préférences en termes de goût ou d'acceptation sociale (vis-à-vis des collègues de travail) pouvant influencer la prise en main et l'acceptation d'une interface. Seule l'interface *Mixte* (courbe verte) n'a pas de dimension avec un score inférieur à 1,5 et reste même supérieure à l'interface référentielle *Tablette* pour l'ensemble des dimensions sauf *Qualité Pragmatique*.

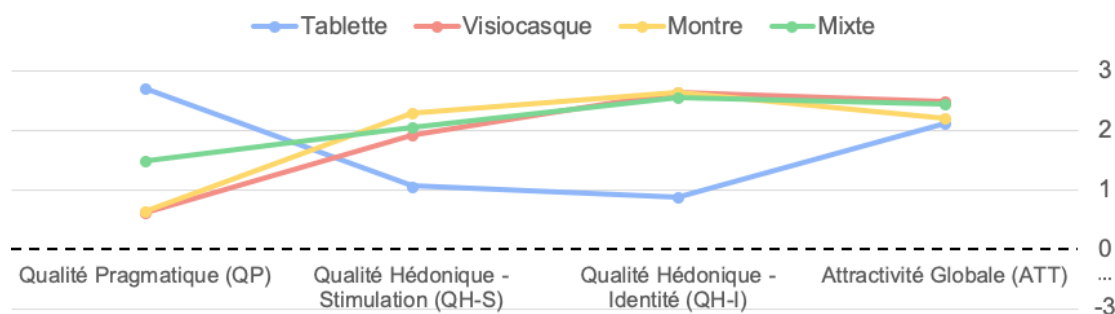


Figure 3.46: Moyenne des scores par dimension de l'AttrakDiff pour chaque interface.

Les résultats pour chaque question (différenciateur sémantique) sont présentés sur la Figure 3.47. Les interfaces *Montre* et *Visiocasque* présentent des scores inférieurs à 1 concernant la simplicité, la praticité, et la prévisibilité, tous relatifs à la dimension pragmatique. L'interface référentielle *Tablette* présente aussi des scores inférieurs à 1 concernant l'ennui (0,5) et le goût (0,5).

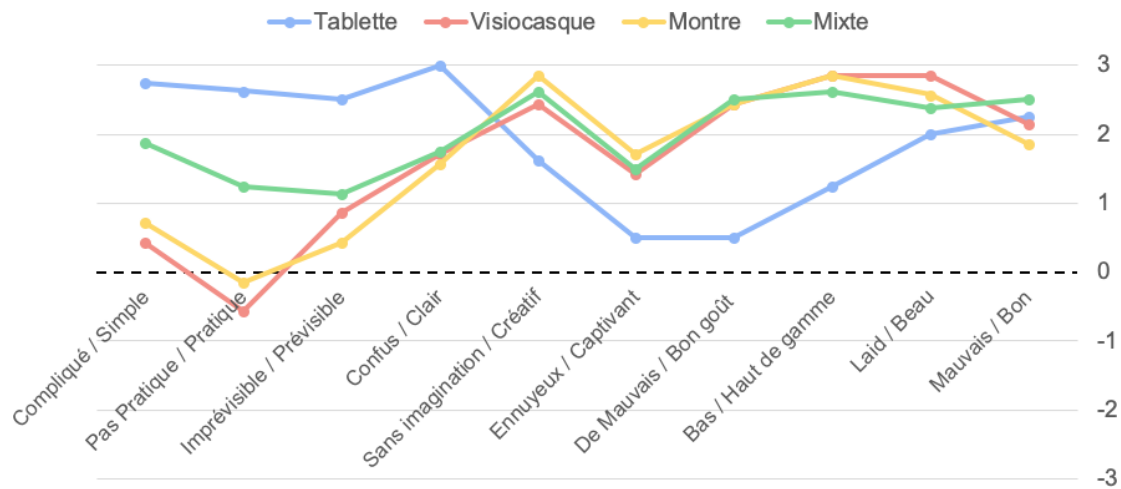


Figure 3.47: Moyenne des scores par paire de mots de l'AttrakDiff pour chaque interface.

3.5.6.7 Préférences et remarques

Les résultats du classement des interfaces récoltés par le questionnaire personnalisé sont reportés sur la Figure 3.48. Le score moyen variant entre 0 et 3 est calculé par une pondération du classement, 3 points pour le premier, 2 points pour le second, 1 point pour le troisième et aucun point pour le dernier. L'interface *Tablette* arrive en premier avec une moyenne de 2,75 (intervalle de confiance 95,0 % = 0,59) suivie de l'interface *Mixte* (moyenne = 2,13 ; intervalle de confiance 95,0 % = 0,30), *Visiocasque* (moyenne = 0,88 ; intervalle de confiance 95,0 % = 0,54) et *Montre* (moyenne = 0,25 ; intervalle de confiance 95,0 % = 0,39).

Par ailleurs, plusieurs remarques ouvertes ont été portées à l'égard des gestes de la main en l'air de l'interface *Visiocasque*, concernant la fatigue induite sur le bras ou la main ($n = 3$) mais aussi pour des raisons d'acceptation sociale (devant les collègues), notamment en caractérisant l'interaction de « *ridicule* ». Un participant aurait souhaité avoir la correction automatique et suggestion des mots aussi pour les interfaces impliquant le visiocasque tandis qu'un autre participant a suggéré l'utilisation de la voix pour saisir de longs commentaires. Le visiocasque en lui-

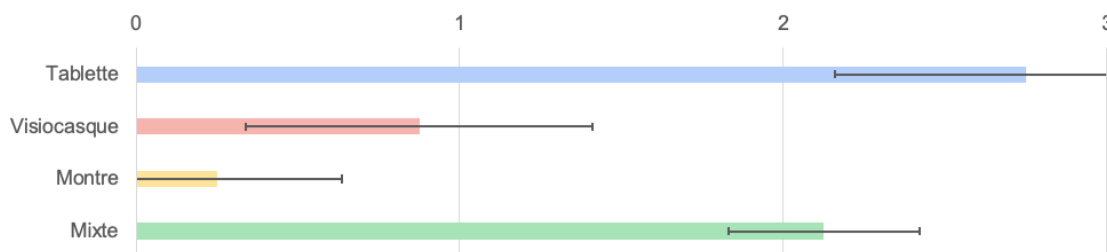


Figure 3.48: Moyennes (avec intervalle de confiance 95 %) des scores de classement variant entre 0 (dernier) et 3 (premier) de préférence des interfaces.

même a fait l'objet de remarque concernant son poids et les maux de cou ($n = 2$) ou des yeux ($n = 3$) et un participant a mentionné d'éventuels problèmes d'occlusion du monde réel par du contenu virtuel : « *il va falloir que l'on regarde où on met les pieds* ». Quatre participants ont enlevé leurs gants pour saisir des caractères sur la montre durant l'expérimentation, malgré la compatibilité de ces derniers avec les écrans tactiles. Les participants ont mentionné que la détection du contact était moins efficace avec les gants. L'interface *Mixte* laissait aussi la possibilité aux utilisateurs de saisir du texte avec les deux autres interfaces, ainsi, l'instructeur a observé deux participants mélangeant les interfaces simultanément, ce qui fut confirmé par les remarques de ces derniers : « *c'est plus rapide car on peut mixer, quand on arrive pas avec l'un [on change]* », puis en saisissant les caractères avec les mouvements de la tête et un appui simple sur la montre « *je corrige avec la gestuelle [l'interface Montre dans son cas], car c'est plus rapide* » et d'un autre participant « *les numéros c'est bien avec la montre [...] mais pour écrire les lettres, [c'est mieux] avec la gestuelle [l'interface Visiocasque dans son cas]* ». Néanmoins, les traces ne nous ont pas permis de relever le taux d'utilisation de chacune des techniques.

3.5.7 Discussion

L'ensemble des mesures rapporté sur le tableau 3.6 sont cohérentes entre elles et laissent entrevoir des tendances. L'interface référentielle *Tablette* obtient généralement de meilleurs scores dus à sa familiarité causée par son utilisation intensive (quasi quotidiennement sur plusieurs mois) par les participants. Parmi les interfaces utilisant le visiocasque, l'interface *Mixte* de ControlWear obtient des résultats proches de l'interface référentielle *Tablette* et présente de nombreux résultats meilleurs que l'interface référentielle *Visiocasque* ou *Montre*, toutes deux jugées moins bonnes avec des résultats relativement similaires.

	Tablette	Visiocasque	Montre	Mixte
Vitesse de saisie de texte (mots par minute)	<u>19,39</u>	4,04	1,25	<i>4,63</i>
Nombre de frappes par caractères	<u>1,07</u>	<i>1,10</i>	3,94	1,35
Vitesse d'exécution d'une tâche (hors saisie de texte, en secondes)	<u>119</u>	207	176	<u>119</u>
Charge de travail (index brut du NASA-TLX)	<u>20,52</u>	42,29	47,08	<i>33,44</i>
Utilisabilité (score du SUS)	<u>89,69</u>	69,38	69,06	<i>76,88</i>
Expérience utilisateur (score totale de l'AttrakDiff)	<i>1,90</i>	1,66	1,69	<u>2,01</u>
Préférence	<u>2,75</u>	0,76	0,25	<i>2,12</i>

Tableau 3.6: Résumé des résultats de l'étude utilisateurs *in situ* en faisant ressortir le premier (souligné) et *second* (italique) score.

L'étude fut limitée sur certains aspects. La topologie de la salle et ses points d'intérêts sujets à inspection n'ont pas permis d'explorer des espaces restreints ou

postures jugées difficiles. Le nombre total de participants reste faible pour généraliser les résultats, de plus, nous avons souhaité valider écologiquement les interfaces, avec des utilisateurs en situation quasi réelle dans leur environnement de travail, nous n'avons pas imposé de texte à saisir, les participants étaient libres de saisir le commentaire qu'ils souhaitaient en restant appropriés avec leur tâche d'inspection. Par conséquent, (1) la potentielle difficulté et la taille du texte saisi étaient différentes suivant les participants, (2) le taux d'erreur ne peut pas être calculé pour les erreurs non corrigées, car il n'y a pas d'écart avec un texte d'origine, (3) l'instruction de reproduction à l'identique des commentaires tout au long de l'expérimentation n'a pas toujours été respectée parmi les participants, ainsi le texte saisi fut différent suivant les interfaces. Par ailleurs, l'interface *Mixte* a pu jouir d'un avantage d'apprentissage du système dans son ensemble suite à l'ordre choisi. Seul l'ordre des interfaces *Visiocasque* et *Montre* a été contrebalancé, les participants finissaient toujours avec l'interface *Mixte*. Enfin, les résultats concernant la vitesse de saisie de texte et le nombre de frappes par caractère pour l'interface *Montre* sont difficilement interprétables autrement qu'en les considérant comme un échec, causé par une reconnaissance automatique des caractères défaillante.

3.6 Collection de modèles de type Graffiti

À la suite de l'étude utilisateurs *in situ*, présentée ci-dessus, plusieurs faiblesses liées à l'implémentation de la reconnaissance des caractères ont été identifiées :

- Une source unique des modèles par un seul utilisateur, limitant la généralisation de la reconnaissance indépendamment des utilisateurs.
- Des modèles basés sur un style d'écriture (cursive) et une typographie propice aux erreurs avec plusieurs façons d'écrire les caractères et peu de caractéristiques discriminantes (des modèles trop ressemblant) entre eux.
- Un manque d'évaluations formelles des modèles collectés.

- Un manque d’aides visuelles pour tracer certains modèles (uniquement les lettres de l’alphabet étaient présentes sur le disque virtuel).

À cet égard, nous avons entrepris de garder le même algorithme, mais de changer l’ensemble des modèles.

3.6.1 Modèles

Les nouveaux modèles sont basés sur l’alphabet *Graffiti*¹⁰, qui fut notamment utilisé comme alphabet pour saisir du texte manuscrit, caractère par caractère, sur les premières générations de téléphones intelligents. Plusieurs études ont montré que l’alphabet Graffiti offrait une utilisabilité immédiate (MacKenzie et Zhang, 1997) car les symboles sont très proches des lettres romaines (en capitale) déjà connues par les utilisateurs, par conséquent, l’alphabet est apprécié par les novices (Castellucci et MacKenzie, 2008). Néanmoins, cette dernière étude et une autre comparant l’écriture manuscrite basée sur l’alphabet *Graffiti* avec un clavier virtuel (Fleetwood *et al.*, 2002) ont aussi montré qu’il y avait une différence de niveau significative entre un novice et expert, par exemple avec une vitesse de saisie de texte variant entre 4 et 21 mots par minute. Contrairement à notre implémentation de l’interface visuelle de ControlWear, les participants de leur étude n’avaient pas de visuel direct et permanent sur les symboles des caractères.

Par ailleurs, nous avons légèrement adapté l’alphabet *Graffiti* pour éviter des confusions rapportées par les précédentes études, notamment les couples de lettres originellement symétriquement opposées, F/T et K/X (Figure 3.49) puis les lettres Q et Y pour être plus proche de leur écriture romaine capitale.

L’ensemble des caractères utilisés comme modèle est présenté sur la Figure 3.50.

10. Graffiti a été développé par Jeffrey Hawkins pour l’entreprise Palm, Inc.

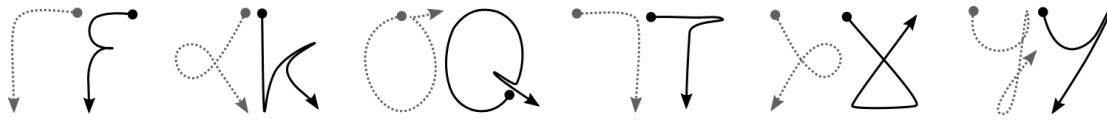


Figure 3.49: Caractères basés sur Graffiti mis à jour : F, K, Q, T, X et Y (ancienne version à gauche en pointillé gris, nouvelle version à droite en trait continu noir).

Outre la mise à jour des 6 caractères, nous avons utilisé le symbole de zéro (caractère *O barré obliquement*) pour l'équivalent du chiffre 0, afin d'éviter les confusions avec la lettre O. Les 4 derniers caractères (en bas à droite de la Figure 3.50) représentent (respectivement de gauche à droite) : l'espace, le retour arrière (correction), le retour à la ligne (validation) et le dernier, le triangle, permet de réaliser des combinaisons (par exemple pour gérer la casse ou les caractères spéciaux).

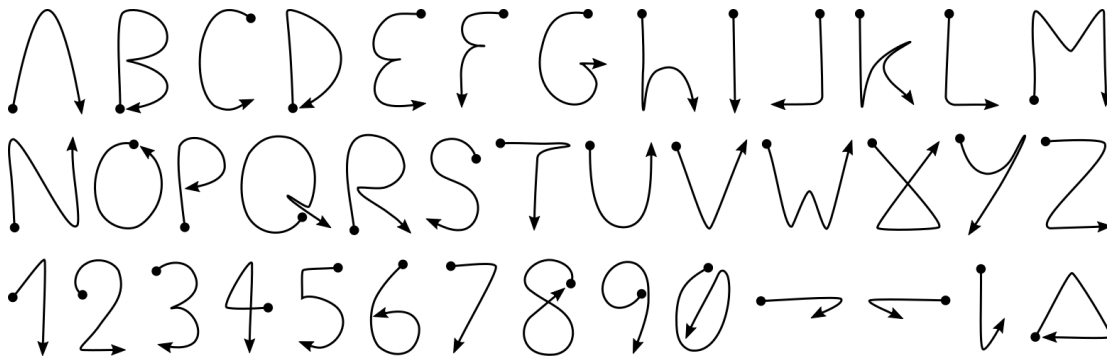


Figure 3.50: Ensemble complet des caractères basés sur Graffiti (de haut en bas et de gauche à droite : l'alphabet, les chiffres, l'espace, le retour arrière, le retour à la ligne, et un caractère de combinaison).

3.6.2 Collecte des nouveaux modèles pour la reconnaissance des caractères

Une étude a été menée avec comme objectif de collecter et mesurer formellement l'efficacité des nouveaux modèles basés sur Graffiti.

3.6.2.1 Matériel et logiciel

Le module ControlWear pour Unity a été utilisé pour concevoir un outil logiciel dédié à la collecte des modèles. L'outil est utilisable sur un ordinateur personnel pour simplifier la collecte des modèles. La montre envoie les données de la même manière, à travers le téléphone intelligent qui les renvoie à l'ordinateur personnel. L'interface de l'outil (Figure 3.51, gauche) présente au participant l'exemple du modèle à dessiner, ainsi que d'autres informations textuelles telles que la vitesse de saisie (en milliseconde) et la quantité de caractères ou d'exemplaires restant à dessiner. L'outil incluait aussi la gestion du calcul des résultats accessibles par des raccourcis clavier, les résultats étaient présentés sur la console de l'éditeur Unity sous forme de texte.

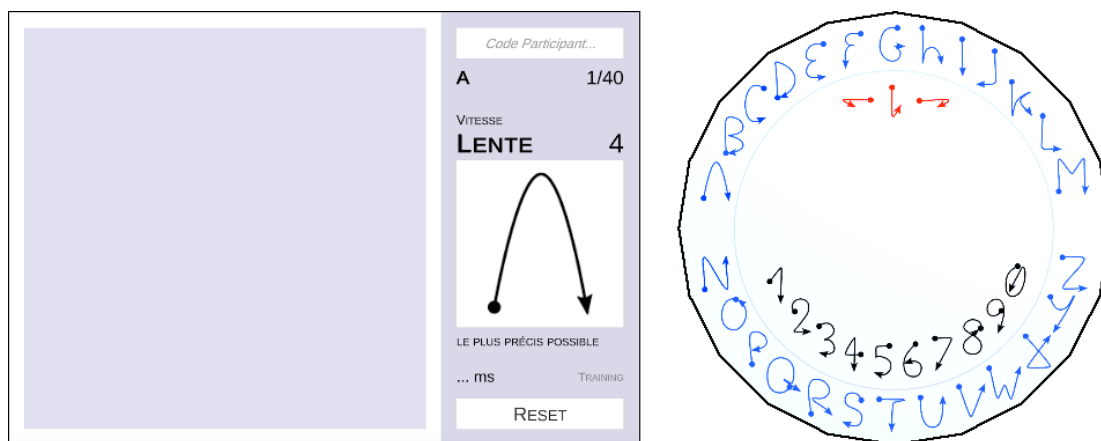


Figure 3.51: Interface du logiciel de collection des modèles (gauche) et nouveau disque de l'interface de ControlWear pour le visiocasque de réalité augmentée (droite).

3.6.2.2 Participant et procédure

Neuf volontaires ont participé individuellement à la collecte des modèles (3 femmes, 6 hommes ; entre 30 et 39 ans, 34 en moyenne ; 2 gauchers et 7 droitiers). Chaque

participant portait la montre connectée au poignet de leur main non dominante. Après une brève explication de la procédure et un entraînement sur 4 modèles non collectés (un rectangle, un coeur, une spirale et une étoile), les participants devaient saisir l'ensemble des caractères (présenté aléatoirement) en 4 exemplaires pour 3 vitesses (rapide, normale, lente). Pour la vitesse lente, nous demandions aux participants de dessiner les modèles le plus précisément possible, puis, au contraire, le plus rapidement possible pour la vitesse rapide, et enfin d'équilibrer vitesse et précision pour la vitesse normale. Tous les participants se tenaient face à l'ordinateur et avaient comme instructions (1) de recommencer le dessin d'un modèle jugé par eux-mêmes insatisfaisant et (2) de se concentrer sur le retour visuel présenté par le logiciel plutôt que regarder l'écran tactile de la montre. Au total, 9 participants x 40 caractères x 3 vitesses x 4 exemplaires, soit 4320 modèles collectés (480 par participant). La collecte des modèles durait environ 30 minutes par participant. Cette procédure est inspirée de l'étude présentant la collecte des modèles d'exemples pour *\$1*, le premier de sa famille d'algorithme (Wobbrock *et al.*, 2007).

3.6.2.3 Résultats

Nous avons testé les modèles dépendamment des participants en effectuant une validation croisée de 4 échantillons : 3 des 4 exemplaires de chacune des 3 vitesses pour l'ensemble des 40 caractères servaient à l'entraînement (soit 360 modèles, 9 modèles par caractère) tandis que l'exemplaire non utilisé servait de test (soit 120 modèles). Pour chaque participant la procédure est répétée 4 fois en changeant d'exemplaire. La moyenne des taux de reconnaissance pour l'ensemble des participants était de 95,5 % (écart-type = 2,89).

Nous avons testé les modèles indépendamment des participants en effectuant une validation croisée de 9 échantillons : 8 participants avec l'ensemble des 40 caractères, 3 vitesses et 4 exemplaires servaient à l'entraînement (soit 3840 modèles) tandis que le participant non utilisé servait de test (soit 480 modèles). La procédure est répétée 9 fois, pour chaque participant. La moyenne des taux de reconnaissance était de 91,3 % (écart-type = 3,80), avec un maximum de 97,9 % pour un participant.

3.6.3 Discussion

Nous avons entrepris d'améliorer notre implémentation de la reconnaissance des caractères de l'interface ControlWear, à cet égard, nous avons :

- facilité le dessin en basant nos modèles de caractères sur un alphabet éprouvé, proche de l'écriture romaine (en majuscule) ;
- récolté les modèles avec plusieurs utilisateurs ($n = 9$) et plusieurs vitesses de saisie ($n = 3$) ;
- affiché l'ensemble des modèles sur la disque virtuel (de l'interface ControlWear) en guise d'aide visuelle (Figure 3.51, droite) ;
- affiché un point d'origine et sens du dessin préférable sur les modèles de l'aide visuelle.

Avec 91,3 %, le taux de reconnaissance des caractères indépendamment des participants est trop faible pour être utilisé en production, ce dernier devrait dépasser 97 % pour être accepté par les utilisateurs, néanmoins l'acceptation est affectée par le contexte d'usage (LaLomia, 1994). Ainsi, nous considérons le résultat acceptable pour réaliser une expérimentation dans un environnement contrôlé, jugé moins stricte qu'une utilisation en production.

3.7 Étude utilisateurs 2 : contrôlée

Après avoir mis à jour l’implémentation de la reconnaissance automatique des caractères, nous avons conduit une étude utilisateurs contrôlée en laboratoire pour comparer les trois interfaces de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée (*Montre*, *Visiocasque* et *Mixte*) dans quatre situations représentatives du contexte industriel (*Debout*, *Couché*, *Mains occupées* et *Espace restreint*) ayant une potentielle influence sur les performances de saisie de texte. Dans ce même contexte, les utilisateurs saisissent régulièrement de simples commentaires et mots clés, ainsi nous nous intéressons à comparer les interfaces avec quelques phrases courtes.

Le plan expérimental de l’étude était de type intra-sujets, avec deux variables indépendantes, la situation (4 conditions) et l’interface (3 conditions), puis trois variables dépendantes en relation avec les performances : la vitesse de saisie de texte, le taux d’erreur et le nombre de frappes par caractère. Hors entraînement, le nombre de phrases retranscrit correspondait à :

- 12 participants x 4 situations x 3 interfaces x 4 phrases = 576 phrases.

Hormis l’évolution des modèles des caractères, les trois interfaces (*Montre*, *Visiocasque* et *Mixte*) sont similaires à celles de l’étude utilisateurs précédente, présentées dans les parties 3.4 et 3.5.3.1. L’interface *Tablette* n’a pas été intégrée à cette étude, car elle fut jugée déraisonnable pour les situations étudiées.

3.7.1 Situations

Les quatre situations sont illustrées sur la Figure 3.52 :

- *Debout*, le participant est en position debout, sans contraintes particulières.
- *Espace restreint*, le participant est en position debout dans un espace res-

treint, une zone de $0,25 \text{ m}^2$ ($50 \times 50 \text{ cm}$), cloisonnée sur trois côtés, le dernier côté n'était pas fermé mais l'instructeur s'assurait que le participant ne sortait pas de la zone, y compris les parties supérieures du corps.

- *Couché*, le participant est couché sur le dos (par exemple pour réparer des machines industrielles).
- *Mains occupées*, le participant tient des outils dans chaque main, un outil à manche dans la main dominante et une mallette dans l'autre.

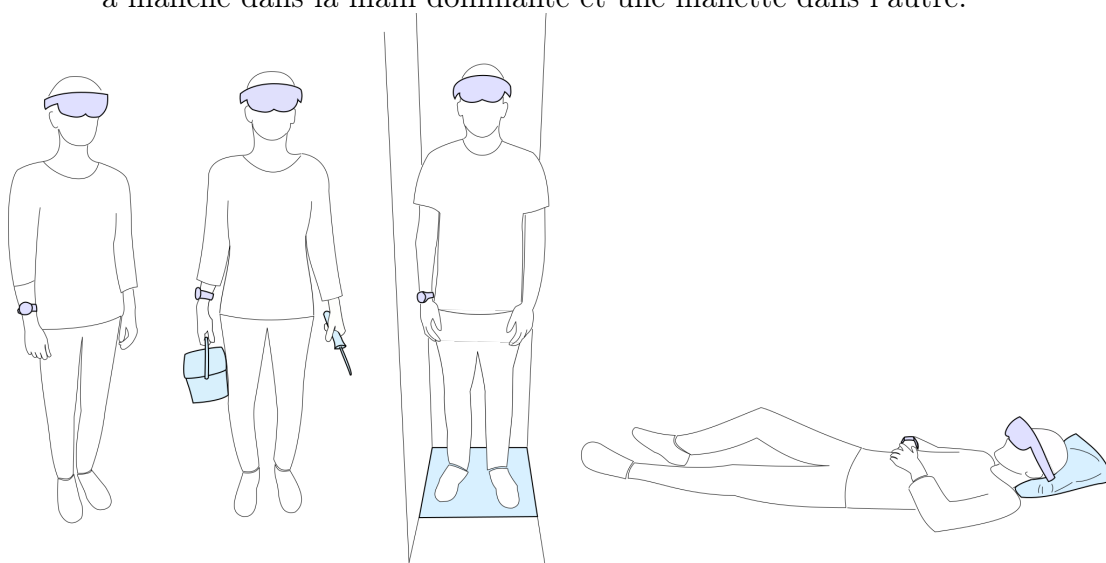


Figure 3.52: Illustration des situations : *Debout*, *Mains occupées*, *Espace restreint* et *Couché*.

3.7.2 Participants

Douze volontaires ont participé à cette expérimentation (2 femmes, 10 hommes, entre 22 et 30 ans, moyenne = 21,7 ; écart-type = 4,4). Les participants ont été recrutés sur le campus universitaire lavallois de l'Université du Mans par le bouche-à-oreille et aucun n'a reçu de compensation financière. Tous les participants ont déclaré lire, écrire et comprendre des phrases simples en anglais (moyenne = 3,4 ; écart-type = 1,2 ; sur une échelle de 1 à 5 entre novice et langue maternelle) et ils utilisaient tous habituellement des claviers avec une disposition AZERTY. Tous

les participants étaient droitiers et 5 d’entre eux portaient des correcteurs visuels (paire de lunettes ou lentilles). Tous les utilisateurs ont appris à écrire à la main. Les utilisateurs n’ont pas l’habitude de manipuler des montres connectées ni des visiocasques de réalité augmentée, ils ont noté leurs expériences (de 1 à 5 entre novice et expert) avec ces technologies comme telles :

- Montre connectée, moyenne 1,4 (écart-type = 1,0).
- Visiocasque de réalité augmentée, moyenne = 1,5 (écart-type = 1,3).

3.7.3 Appareils

Le matériel de cette étude (Figure 3.53) comprenait le visiocasque de réalité augmentée Microsoft HoloLens (1^{ère} génération), la montre connectée Fossil Sport et le téléphone intelligent Google Pixel. La montre connectée est portée sur le poignet de la main non dominante. Outre les appareils technologiques, pour satisfaire les contraintes des situations, l’étude incluait un outil à manche (tel qu’un tournevis ou une spatule), une légère boîte à outils (environ 24 x 17 x 12 cm, pesant 1,2 kg), un coussin (pour amortir l’arrière du visiocasque de réalité augmentée HoloLens), puis une nappe de 50 cm² et une table renversée (pour délimiter l’espace restreint autorisé).

3.7.4 Logiciel

Une application a été conçue avec une interface visuelle épurée pour seulement afficher et retranscrire les phrases du corpus (voir Figure 3.54) puis enregistrer automatiquement les événements et actions des participants dans des traces. Les phrases apparaissent à travers le visiocasque sur une fenêtre flottante (mesurant 76,8 par 35,2 cm) restant proche du champ de vue de l’utilisateur (25 degrés de liberté) à 1,8 m de distance. L’interface visuelle reste identique pour toutes les



Figure 3.53: Visiocasque de réalité augmentée Microsoft HoloLens, montre connectée Fossil Sport et téléphone intelligent Google Pixel.

situations. Une application sur téléphone intelligent a été conçue pour intégrer l'interface ControlWear (servant entre autres de passerelle d'informations entre la montre et le visiocasque), mais aussi pour contrôler le choix des situations, interfaces et identifiants des participants.

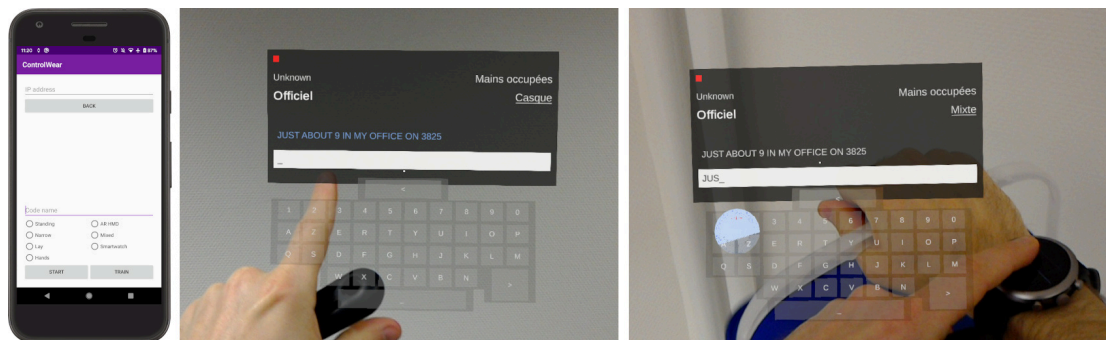


Figure 3.54: Visuel de l'interface de l'application mobile accompagnant l'instructeur (gauche) et de l'application sur visiocasque.

3.7.5 Tâche

La tâche consistait à retranscrire 4 phrases aussi vite que possible en faisant le moins d'erreurs (par conséquent les erreurs étaient autorisées) pour chacune des situations avec toutes les interfaces. L'ordre des phrases est aléatoire, mais elles restent identiques pour tous les participants, toutes les situations et interfaces. Les phrases (présenté sur le tableau 3.7) ont été sélectionnées dans le corpus Enron (Vertanen et Kristensson, 2011) afin de retrouver au minimum une fois chaque lettre et chiffre, et ont entre 27 et 33 caractères chacune (121 au total). Les phrases sont déjà considérées facilement mémorables, cependant, nous les avons tronquées et avons changé la casse des caractères pour qu'ils soient tous en majuscules (pour des raisons de proximité visuelle et de cohérence avec nos modèles basés sur Graffiti). Nous avons choisi un corpus avec des phrases en anglais pour des raisons de standardisation avec la communauté, ce corpus est régulièrement utilisé dans diverses études utilisateurs sur les interfaces de saisie de texte.

Index	Phrase	Nombre de caractères
1	1967 WAS SPECIFICALLY NOT COVERED	33
2	QUICKER THAN SELLING BRAZIL	28
3	USE CELL FOR NEXT 40 MINUTES	33
4	JUST ABOUT 9 IN MY OFFICE ON 3825	27

Tableau 3.7: Ensemble de phrases utilisé pour la tâche de retranscription basé sur le corpus Enron (Vertanen et Kristensson, 2011).

3.7.6 Procédure

Après avoir accueilli les participants individuellement avec une brève explication de la procédure, notamment sur les trois types d'interfaces et quatre situations, les

participants commençaient par répondre à un questionnaire (Annexe D.3) pour récolter des informations démographiques (l'âge, le genre et l'expérience relative aux technologies), puis s'entraînaient pendant environ 5 minutes avec chacune des interfaces (dans la situation debout) pour se familiariser avec la gestuelle de la main et l'écriture manuscrite sur la surface tactile de la montre. Les participants procédaient ensuite à la tâche de retranscription des phrases pour l'ensemble des situations une après l'autre (Figure 3.55), avec chacune des interfaces. D'une manière similaire à la précédente étude utilisateurs, lorsque les participants effectuaient la retranscription avec l'interface *Mixte*, ils avaient la liberté de saisir le texte avec les interfaces *Montre* et *Visiocasque*. Les conditions des situations et des interfaces ont été individuellement contrebalancées suivant des carrés latins d'ordre 4 et 3. Les participants devaient définir leur interface préférée après chaque situation. Au total, l'expérimentation a duré en moyenne 93 minutes par participant.



Figure 3.55: Une participante dans les situations : *Couché*, *Mains occupées* et *Espace restreint*.

3.7.7 Résultats

L'ensemble des résultats provient des traces, du questionnaire et des remarques rapportées par l'instructeur. Les données des traces d'un participant ont été cor-

rompues et trois phrases ont été validées trop tôt par d'autres participants, ainsi l'analyse de la vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractères est appliquée sur 525 phrases.

Pour rappel, les formules de vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère sont présentées au début de l'état de l'art, partie 2.1.

3.7.7.1 Vitesse de saisie de texte

La Figure 3.56 présente les moyennes de vitesse de saisie de texte (en mots par minute) par situation, par interface et par situation pour chaque interface. Une analyse de variance à deux facteurs a montré que l'interface avait un effet significatif sur la vitesse de saisie de texte ($F_{2,120} = 14,393; p < 0,05$). Les interfaces *Visiocasque* et *Mixte* ont une vitesse similaire avec respectivement 6,2 (écart-type = 2,0) et 6,1 (écart-type = 1,6) mots par minute, mais les participants ont atteint une vitesse moindre avec l'interface *Montre* (moyenne = 4,3; écart-type = 1,3). La différence des moyennes de vitesse entre les situations est plus modeste avec 5,7 (*Debout*), 5,3 (*Couché*), 5,4 (*Espace restreint*) et 5,8 (*Mains occupées*) mots par minute. L'analyse de variance n'a pas rapporté d'effets significatifs autant pour le facteur situation ($F_{3,120} = 0,549$) que pour l'interaction entre les deux facteurs interface et situation ($F_{6,120} = 1,140$).

3.7.7.2 Taux d'erreur et nombre de frappes par caractère

Les phrases ayant été validées trop tôt avec plus de 25 % des caractères saisis ont été conservées dans l'analyse (n = 18, soit 3,4 % de l'ensemble) cependant le texte présenté a été réduit pour compter une seule erreur supplémentaire, la validation (voir l'exemple sur le Tableau 3.8).

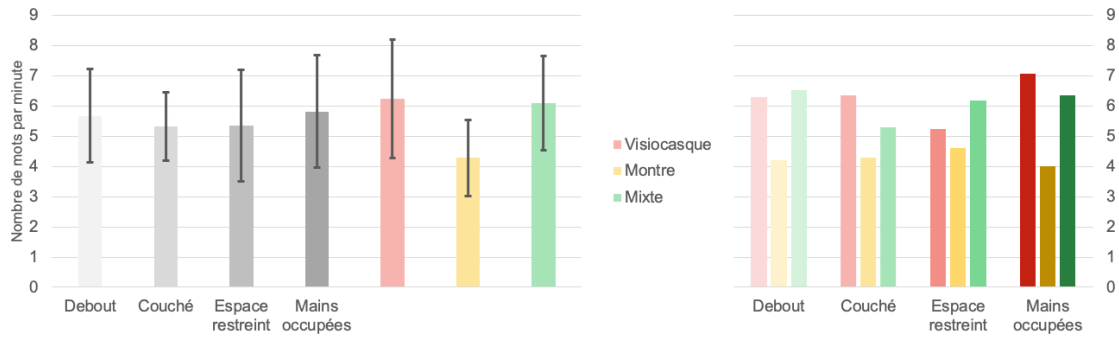


Figure 3.56: Moyennes des vitesses de saisie de texte (en mots par minute) par situation, par interface et par interface pour chaque situation.

	Texte présenté	Texte retranscrit	Taux d'erreur
Original	1967 WAS SPECIFICALLY NOT COVERED	1967 WA5 SPFCIFICALL	45,45
Adapté	1967 WAS SPECIFICALLY	1967 WA5 SPFCIFICALL	14,29

Tableau 3.8: Exemple de mise à jour du taux d'erreur pour les phrases validées trop tôt.

Les moyennes des taux d'erreur sont présentées sur la Figure 3.57. L'interface *Visiocasque* a obtenu le meilleur taux d'erreur avec une moyenne de 1,82 % (écart-type = 1,72), suivi de l'interface *Mixte* avec 3,67 (écart-type = 2,87) puis de l'interface *Montre* avec 5,83 (écart-type = 3,70). Une analyse de variance à deux facteurs a montré que le facteur interface a eu un effet significatif ($F_{2,120} = 11,26; p < 0,05$) sur le taux d'erreur. Le taux d'erreur des situations *Debout*, *Couché*, *Espace restreint* et *Mains occupées* reste similaire avec respectivement 3,51 (écart-type = 2,79), 3,76 (écart-type = 3,66), 3,51 (écart-type = 2,16) et 4,29 (écart-type = 3,04). Le facteur situation ($F_{2,120} = 0,284$) et l'interaction entre les deux facteurs ($F_{2,120} = 0,747$) n'ont pas eu d'effets significatifs sur le taux d'erreur.

Les moyennes du nombre de frappes par caractère sont présentées sur la Figure 3.58. L'interface *Visiocasque* a obtenu le meilleur nombre de frappes par caractère avec une moyenne de 1,08 (écart-type = 0,04), suivi de l'interface *Mixte* avec 1,24 (écart-type = 0,17) puis de l'interface *Montre* avec 1,55 (écart-type = 0,19). Une

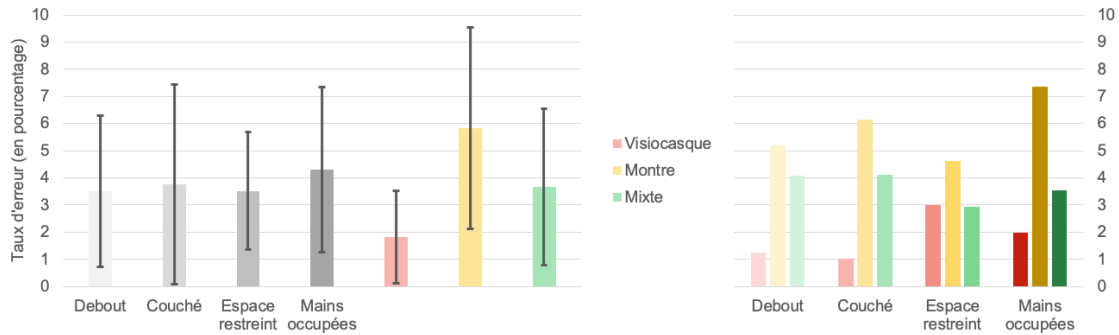


Figure 3.57: Taux d'erreur (en pourcentage) par situation, par interface et par interface pour chaque situation.

analyse de variance à deux facteurs a montré que le facteur interface a eu un effet significatif ($F_{2,120} = 62,314; p < 0,05$) sur le nombre de frappes par caractère. Le nombre de frappe par caractère des situations *Debout*, *Couché*, *Espace restreint* et *Mains occupées* reste similaire avec respectivement 1,28 (écart-type = 0,12), 1,28 (écart-type = 0,09), 1,29 (écart-type = 0,16) et 1,31 (écart-type = 0,19). Le facteur situation ($F_{2,120} = 0,157$) et l'interaction entre les deux facteurs ($F_{2,120} = 0,921$) n'ont pas d'effets significatifs sur le nombre de frappes par caractère.

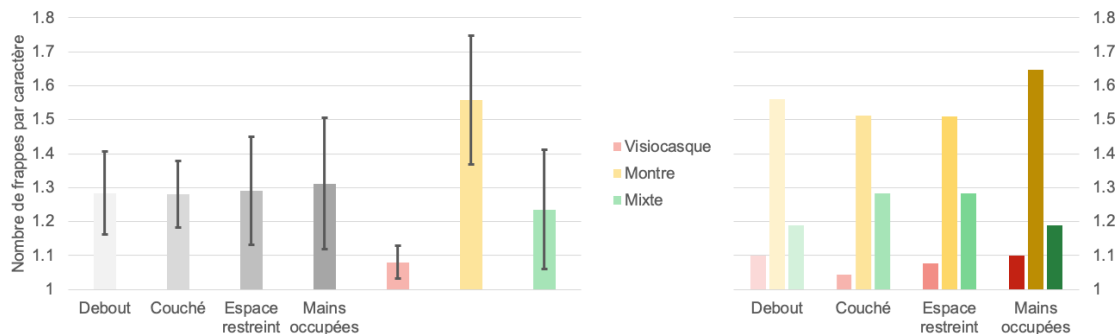


Figure 3.58: Nombre de frappes par caractère (NFPC) par situation, par interface et par interface pour chaque situation.

3.7.7.3 Préférence, utilisation mixte et remarques

Les résultats de préférence des interfaces récoltés après chaque situation sont reportés sur la Figure 3.59. L'interface *Mixte* arrive en premier, suivie de l'interface *Montre*, puis *Visiocasque*. Contrairement à la vitesse de saisie de texte, au taux d'erreur et au nombre de frappes par caractères, les écarts de préférence entre les situations sont prononcés. L'interface *Montre* est particulièrement préférée dans la situation *Couché*, nous expliquons ce résultat par des remarques de participants ($n = 4$) sur la fatigue induite et difficulté à bouger la tête à l'envers : « *[en étant couché] ça travaille un peu [la nuque]* », « *couché c'est difficile d'avoir à bouger le curseur [avec la tête]* », « *préfère la montre [en étant] couché car bouger la tête c'est difficile* », « *c'est galère pour tourner [la tête], du coup j'ai mis une main derrière* ». L'interface *Montre*, étant basée sur l'écriture manuscrite seulement, ne nécessite aucun mouvement de la tête. Ainsi, l'interface *Visiocasque* arrive en dernier (avec seulement 17 %) autant pour la situation *Couché* ou en situation d'*Espace restreint* pour la difficulté à réaliser la gestuelle appropriée, car en plus des mouvements de la tête vient s'ajouter la fatigue des bras en l'air causée par ces positions, à nouveau, confirmée par les remarques des participants ($n = 4$) avec l'interface *Visiocasque* : « *au bout d'un moment ça fait mal au bras* », « *avec l'HoloLens seul, ça travaille un peu les muscles* », « *ça devient vite fatigant, devoir tendre la main* », « *[en comparaison avec l'interface Visiocasque] ça demande moins d'effort la montre* ». Cependant, l'interface *Visiocasque* semble être relativement mieux appréciée (presque autant que l'interface *Mixte*) pour la situation des mains occupées, car dans ce cas, un geste de la main en l'air permet de saisir du texte en laissant l'autre bras porteur de la boîte à outil détendu le long du corps.

Pour rappel, l'interface *Mixte*, en plus d'associer les mouvements de la tête avec

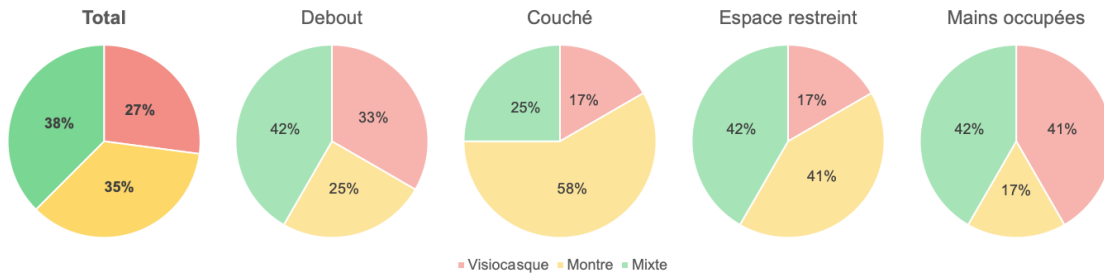


Figure 3.59: Préférence des interfaces (totale et par situation).

l'usage de la montre, donnait aux participants la liberté de saisir du texte de la même manière qu'avec les interfaces *Visiocasque* et *Montre*. L'analyse des traces sur l'utilisation de l'interface *Mixte* permet de différencier le type de saisie choisi par les participants, la Figure 3.60 rapporte le pourcentage dédié à chacun des types sur les 6615 saisies (et corrections) de caractère réalisées pour cette interface. Pour cette figure, l'interface *Tête + appuis montre* correspond à la saisie de caractère multimodale en sélectionnant un caractère avec les gestes de la tête et en le saisissant avec un simple appui sur l'écran tactile de la montre. Les résultats reflètent ceux de la préférence, avec une utilisation moins importante pour l'interface *Visiocasque* au profit de l'interface *Tête + appuis montre* et *Montre*.

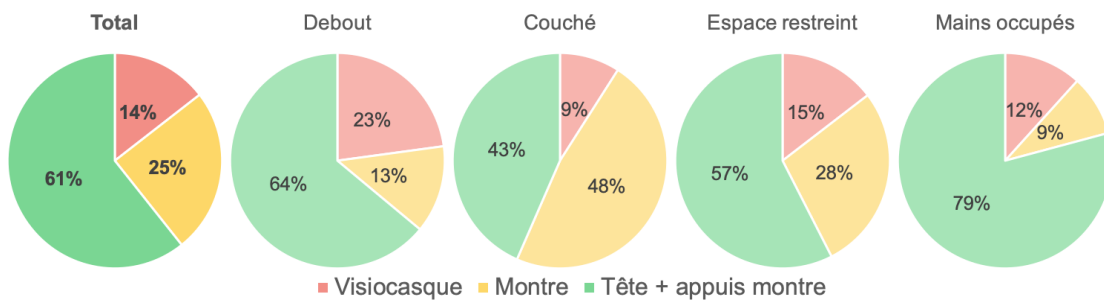


Figure 3.60: Usage détaillé de l'interface *Mixte*.

3.7.8 Discussion

Les résultats reportés pour la vitesse de saisie de texte, le taux d'erreur et les frappes par caractères suivent la même tendance avec des scores similaires pour les interfaces *Mixte* et *Visiocasque*, la *Montre* expose un léger recul. Contrairement à ce qu'on avait supposé pour l'interface *Visiocasque*, ces mêmes mesures rapportées par situation n'ont pas présenté de différences significatives, ainsi, les interfaces *Montre* et *Mixte*, laissent supposer qu'elles pourraient être adéquates dans l'ensemble de ces situations, mais sans avantage vis-à-vis de l'interface *Visiocasque* sur ces critères. Néanmoins, les résultats des préférences et ceux des choix opérés par les participants lors de l'utilisation de l'interface *Mixte* ne sont pas en accord avec les précédents. L'interface *Visiocasque* est la moins préférée, derrière l'interface *Montre*. Nous pensons que cette différence s'explique pour deux raisons. La première est liée aux remarques (précédemment) rapportées par les participants, mentionnant notamment les contraintes physiques des mouvements de la tête et des bras en l'air nécessaires à l'interface *Visiocasque*. La deuxième raison concerne l'apprentissage et l'évolution des compétences. En effet, les participants ont saisi du texte avec les 3 interfaces dans 4 situations, il y a donc eu un effet d'apprentissage. Les résultats de l'évolution par interface sont présentés sur la Figure 3.61 en considérant indifféremment toutes les situations comme des sessions. L'effet d'apprentissage est plus prononcé sur l'interface *Montre*, avec notamment une évolution de la vitesse de saisie de texte entre la première et quatrième session de 60,4 % alors que les interfaces *Mixte* et *Visiocasque* présentent des évolutions respectives de 22,3 % et 11,7 %. Cette évolution est appuyée par des remarques de participants (« *on sent qu'il y a une marge de progression* », « *là je ne regarde plus le cadre* ») et a pu avoir un effet sur le choix de l'interface préférée.

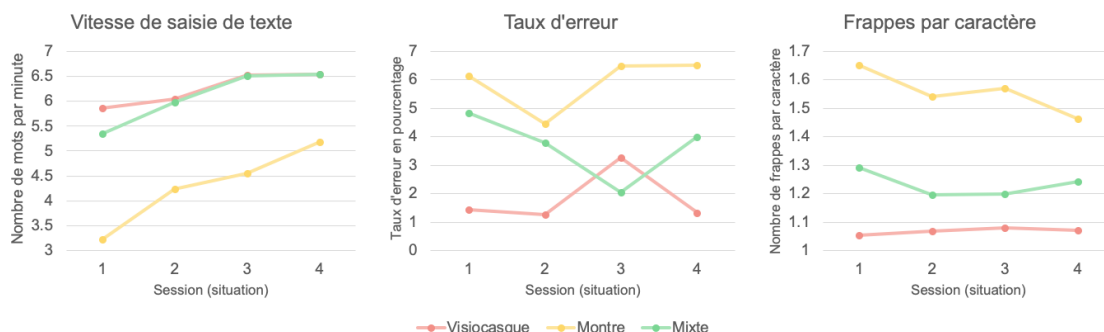


Figure 3.61: Évolution de la vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère rapportée par session.

3.8 Conclusion, limites et perspectives

Après avoir mené une étude préliminaire, montrant le potentiel à adopter le couple montre connectée et visiocasque de réalité augmentée pour des interactions de navigation, nous avons réalisé un état de l'art complémentaire et spécifique aux interfaces de saisie de texte pour montre connectée. Nous avons relevé que les interfaces basées sur l'utilisation de l'écran tactile avaient l'avantage de se reposer sur ce composant standardisé à l'ensemble des montres connectées déjà commercialisées et celles dont l'interaction était continue (en opposition à discrète) permettaient de libérer la concentration du regard pour saisir du texte. À cet égard, nous avons conçu et implémenté ControlWear, une nouvelle interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée dédiée au contexte industriel. Le but est d'exploiter l'écriture manuscrite pour diminuer l'encombrement visuel et l'apprentissage de l'interface en dessinant les caractères un à un sur l'écran tactile de la montre connectée tandis que le tracé est affiché en temps réel sur un disque virtuel flottant par l'intermédiaire du visiocasque de réalité augmentée. Par ailleurs, nous avons implémenté une deuxième technique complémentaire, *Mixte*, fondée sur un usage simplifié de la montre connectée, un appui simple sur l'écran tactile suffit à saisir un caractère auparavant sélectionné sur un clavier virtuel flottant

par l'intermédiaire des mouvements de la tête.

Nous avons d'abord mené une première étude utilisateurs en milieu écologique avec 8 participants sur le chantier du nouveau réacteur de la centrale nucléaire de Flamanville. Les résultats comparatifs ont montré une tendance préférentielle pour la technique *Mixte* de l'interface ControlWear autant sur la vitesse de saisie de texte que sur la charge de travail, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur. Cependant, cette étude utilisateurs a fait ressortir une défaillance critique de la reconnaissance automatique des caractères, ainsi nous avons réalisé une mise à jour des modèles utilisés pour reconnaître les caractères, en nous basant sur l'alphabet Graffiti.

Nous avons mené une deuxième étude utilisateurs en laboratoire, dans un milieu contrôlé avec 12 participants pour mesurer et comparer les performances de l'interface ControlWear en termes de vitesse de saisie de texte, de taux d'erreur et de nombre de frappes par caractère dans différentes situations : en étant debout, couché, dans un espace restreint ou avec les mains occupées. Pour des utilisateurs novices, nous avons montré qu'aucune des situations n'a d'effets significatifs sur les performances mesurées, signifiant que l'on peut utiliser les techniques de l'interface ControlWear indépendamment de la situation. La technique *Mixte* de l'interface ControlWear et l'interface référentielle basée sur les mouvements de la tête et les gestes de la main en l'air ont des performances similaires (environ 6 mots par minute) et supérieures à celles de la technique *Montre* de l'interface ControlWear basé sur l'écriture manuscrite (environ 4,3 mots par minute). Néanmoins, les classements par préférences des interfaces pour chaque situation et total ont montré des différences à contre-courant des performances mesurées. La technique *Montre* de l'interface ControlWear, basée sur l'écriture manuscrite, fut préférée à l'interface référentielle, avec des différences en particulier pour les situations couchées (où la tête est difficile et le bras en l'air fatigue l'utilisateur) et l'espace restreint

(où les bras en l'air sont plus difficiles à réaliser). Par ailleurs, nous avons montré que la technique *Montre* de l'interface ControlWear a bénéficié d'une meilleure progression au niveau des performances.

Nous avons identifié plusieurs limites liées à l'interface ControlWear et proposé des perspectives d'améliorations et d'explorations à court terme.

- **Effort physique.** Nous n'avons pas intégré de variables dépendantes spécifiquement liées à la fatigue musculaire, en particulier pour cibler certaines parties du corps, telles que les bras et la nuque. Les mesures des dimensions *Exigence physique* et *Effort* de la méthode NASA-TLX sont limitées, les échelles manquent de repères verbaux (par exemple, des adjectifs qualifiant la fatigue ressentie) et ne permettent pas de segmenter les membres du corps. Nous pouvons envisager de réaliser d'autres études utilisateurs pour faire ressortir l'effort physique en utilisant des mesures qualitatives standardisées telles que les échelles de Borg RPE et CR10 (Borg, 1998).
- **Progression.** Nous avons remarqué que la technique basée sur l'écriture manuscrite de l'interface ControlWear bénéficiait d'une bonne courbe d'apprentissage, cependant nous n'avons pas mené d'étude utilisateurs pour mesurer spécifiquement la progression des performances sur plusieurs sessions.
- **Parallélisme.** L'implémentation de l'interface ControlWear ne permet pas de bénéficier des mouvements du corps effectués en simultanés pour accélérer la sélection (et saisie) de caractères, ni pour la technique basée sur l'écriture manuscrite (car un seul doigt à la fois peut dessiner des caractères sur l'écran tactile de la montre connectée) ni pour la technique utilisant les mouvements de la tête (car il y a qu'un seul curseur pour une seule tête par utilisateur). Par ailleurs, cette limite contribue à concentrer l'effort physique sur certaines parties du corps.

- **Reconnaissance.** Pour notre implémentation, le taux de reconnaissance des caractères est de 91,3 % indépendamment des utilisateurs. Bien qu'il fut jugé acceptable pour une utilisation contrôlée en laboratoire, il a pu influencer négativement l'utilisabilité et l'appréciation de l'interface basée sur la montre uniquement, à cet égard, nous envisageons de changer d'algorithme.
- **Mots (saisie et suggestion).** Nous n'avons pas intégré de saisie de mots complets, autant par suggestion que par gestuelle. Nous pouvons envisager d'intégrer la suggestion de mots pour la technique basée sur l'écriture manuscrite en prévoyant une gestuelle pour saisir le mot le plus probable ou envisager la saisie de mots par gestuelle avec la technique *Mixte* avec un mouvement de tête pour sélectionner le premier caractère, suivi d'un mouvement de doigt sur l'écran tactile de la montre connectée pour déplacer le curseur sur l'ensemble des caractères composant le mot voulu.

Malgré le potentiel et les nombreuses perspectives d'améliorations pour utiliser une montre connectée avec un visiocasque de réalité augmentée dans un environnement industriel, nous aborderons dans le chapitre suivant l'environnement de bureau. Dans ce contexte, considéré sans danger, et impliquant des saisies de texte relativement longues, les dimensions contraignantes changent, la vitesse prime et les libertés des mains et du regard sont moins importantes. Par conséquent, nous présenterons une tout autre interface, le Keycube.

CHAPITRE IV

KEYCUBE

Dans les environnements de travail de bureau, les ordinateurs personnels sont communs et les claviers traditionnels restent l'interface de saisie de texte la plus utilisée. De nombreuses études concernent l'exploitation de ce périphérique avec des visiocasques (présentées dans l'état de l'art, section 2.3.1). Cependant, en dépit de ses nombreuses qualités (différentes possibilités et libertés d'utilisation, par exemple vis-à-vis du nombre de doigts utilisés, avec ou sans regard), le clavier traditionnel requiert un support, telle qu'une surface plane et fixe. Par conséquent, l'appareil et l'utilisateur sont essentiellement immobiles, une situation que nous estimons incompatible avec les expériences de réalité augmentée, où l'utilisateur peut être amené à se déplacer régulièrement pour profiter pleinement du potentiel de son environnement et de la caractéristique de mobilité des visiocasques. Que ce soit pour développer des applications en réalité augmentée (le scénario à l'origine de la motivation, présenté dans l'introduction), pour assister à une réunion virtuelle interactive, pour éditer une présentation assistée par ordinateur ou pour toutes autres activités intégrées (ou intégrant de plus en plus de contenus virtuels) en réalité augmentée, l'utilisateur est invité à se déplacer et réaliser des déplacements entre la position assise traditionnelle et des situations de mobilité dans l'environnement de son bureau.

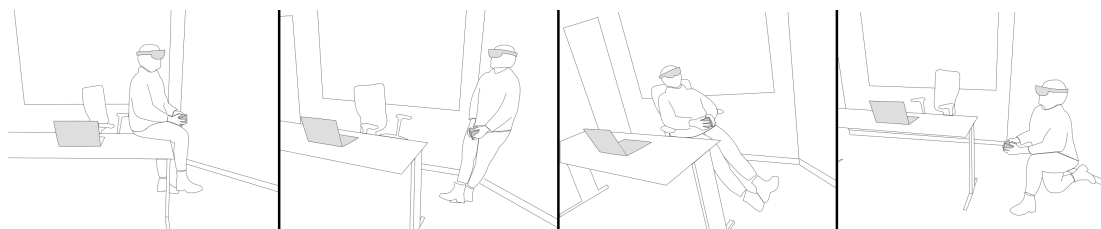


Figure 4.1: Illustration de l'utilisation du keycube dans un environnement de bureau.

Ainsi, le Keycube est une interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée directement inspirée du clavier traditionnel, après avoir subi une transformation de forme, en passant d'une surface plane à un cube. L'objectif est de conserver au maximum les caractéristiques du clavier traditionnel, pour bénéficier de ses avantages, tout en supprimant son principal inconvénient, l'immobilité. La Figure 4.1 illustre des situations d'utilisation du keycube.

Nous présentons dans ce chapitre (Figure 4.2), un état de l'art spécifique dédié aux appareils interactifs de forme cubique, puis nous détaillons le concept et l'implémentation du keycube. Nous poursuivons avec la description de deux études utilisateurs dédiées à la conception de la disposition cubique des caractères, pour finir par deux études utilisateurs comparant différentes dispositions cubiques, différentes interfaces de saisie de texte pour visiocasque puis une étude de cas apportant un aperçu des performances sur la durée.

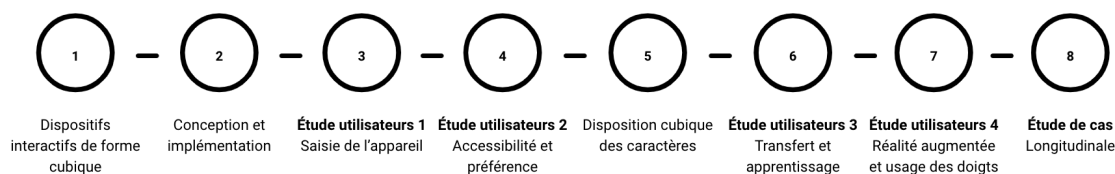


Figure 4.2: Organisation du chapitre sur l'interface Keycube.

4.1 État de l'art spécifique : dispositifs interactifs de forme cubique

La forme du cube est devenue populaire dans le domaine des interactions humain-machine depuis que Sheridan *et al.* (2003) ont exploré puis montré ses propriétés et son potentiel naturel (aussi appelé *affordance*). Dans cette section, nous rapportons les travaux de recherche sur les appareils interactifs de forme cubique, catégorisés par leur fonction principale : la navigation et l'exploration, la manipulation tridimensionnelle puis l'apprentissage. Sauf exception, tous les cubes présentés fonctionnent de pair avec un système informatique, prenant par exemple la forme d'un ordinateur personnel, d'un téléphone intelligent ou même d'un visiocasque de réalité augmentée. Pour chaque catégorie, les travaux sont présentés dans l'ordre chronologique de publication.

4.1.1 Exploration et navigation

De nombreux appareils interactifs de forme cubique sont dédiés à l'exploration et la navigation, que ce soit pour agir sur des histoires, des bases de données ou des menus.

Navigational Blocks représente un ensemble de cubes dont leurs mouvements, orientations et positions relatives les uns aux autres, aident à naviguer et explorer une *galerie* virtuelle présente sur un site historique (Figure 4.3). Les visiteurs sont encouragés à organiser spatialement les cubes pour former des requêtes avec des mots clés simples, par exemple « Quand » et « Qui » (Camarata *et al.*, 2002).

D'autres auteurs ont utilisé la forme cubique pour naviguer à travers des documents multimédias, notamment des contenus télévisuels (Block *et al.*, 2004). Les rotations du cube physique sont synchronisées avec un cube virtuel présenté sur une télévision, ce dernier affiche du contenu différent (par exemple des chaînes de

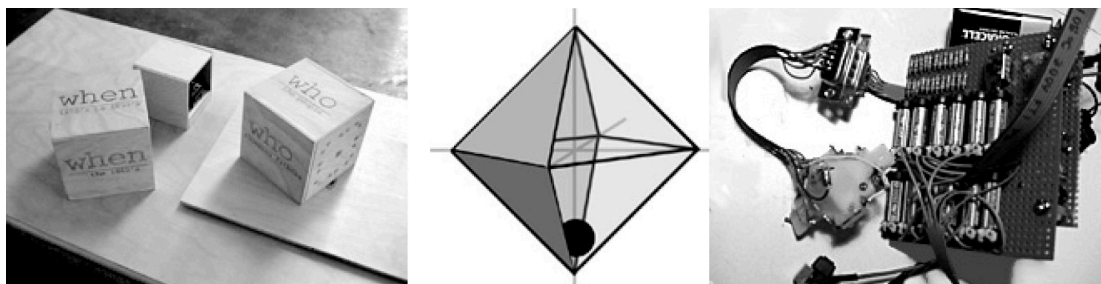


Figure 4.3: *Navigational Blocks*. Ensemble de cubes dédié à l'exploration d'une *galerie virtuelle*. Illustration extraite de (Camarata *et al.*, 2002)

télévision) sur chacune de ses faces (Figure 4.4). Les auteurs ont notamment mené une étude comparative avec d'autres formes, tels qu'un cylindre ou une sphère, mais le cube simplifiait la construction d'un modèle mental par les utilisateurs avec des unités de visualisation distinctes, grâce aux faces.



Figure 4.4: Interfaces tangibles pour un système multimédia. Illustration extraite de (Block *et al.*, 2004)

Magic Story Cube est un cube pliable (composé de 8 cubes plus petits) fonctionnant de pair avec un visiocasque de réalité augmentée (Figure 4.5). La manipulation du cube (en le pliant et dépliant dans un ordre unique) permet de naviguer à travers différentes étapes d'une histoire interactivement augmentée par le visiocasque (Zhou *et al.*, 2004).

MusicCube est un cube (ressemblant à un haut-parleur) dédié à la navigation des listes de lectures musicales (Figure 4.6). Un bouton tactile avec cadran rotatif

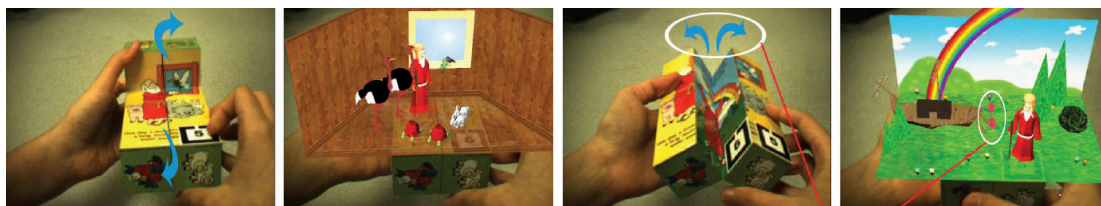


Figure 4.5: *Magic Story Cube*. Cube (dé)pliable dédié à la narration d'histoires. Illustration extraite de (Zhou et al., 2004)

permet de stopper la lecture et d'augmenter ou baisser le volume, le reste des contrôles (ex. changer de liste, mélanger la liste) s'opèrent en effectuant des mouvements du cube et sont accompagnés d'un retour visuel par des codes couleur (Alonso et Keyson, 2005).



Figure 4.6: *MusicCube*. Cube dédié au contrôle musical. Illustration extraite de (Alonso et Keyson, 2005)

Z-agon est une proposition de cube composé de 6 écrans couvrant chacune des surfaces, dédié à la navigation multimédia, de sites d'actualités, de films, de musiques et de cartographies (Figure 4.7, gauche). Les auteurs n'ont pas donné d'explication sur la manière d'interagir avec le cube et n'ont pas implémenté complètement leur proposition. Ils ont seulement proposé un prototype avec des matrices de diodes électroluminescentes (Matsumoto et al., 2006). Plus tard, d'autres auteurs ont proposé et décrit un cube similaire couvert d'écrans, aux multiples fonctionnalités, sans non plus proposer d'implémentation fonctionnelle (Pla et Maes, 2012).

D'autres auteurs ont exploité la réalité augmentée pour narrer une histoire avec un cube (Juan et al., 2008). Pour leurs implémentations, soit le cube est pourvu de 6

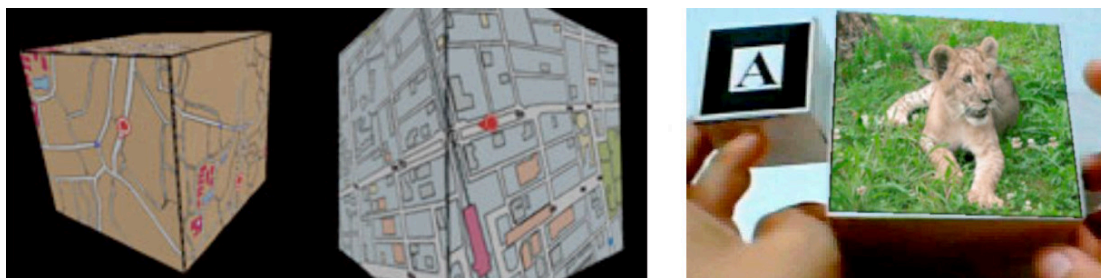


Figure 4.7: À gauche : *Z-agon*, proposition d'un cube couvert d'écrans. À droite : cube dédié à la narration d'histoires en réalité augmentée. Illustrations extraites de (Matsumoto *et al.*, 2006) et (Juan *et al.*, 2008)

marqueurs et l'histoire (à fins multiples) est visuellement présentée (sous forme de vidéo) sur chacune des faces, soit le cube est pourvu d'un seul marqueur et deux autres cubes plus petits permettent de progresser à travers l'histoire, en réalisant un mouvement avec l'un de ces derniers lorsqu'un choix se présente (Figure 4.7, droite).

CubeBrowser est un cube composé de 6 écrans sur chacune des faces permettant de naviguer à travers des bases de données en ligne, tels que des banques d'images (Figure 4.8). La navigation s'opère uniquement avec les mouvements du cube (rotation, secousse), par exemple en tournant horizontalement pour changer d'image ou verticalement pour changer de mot clé (Zeller et Scherffig, 2009).

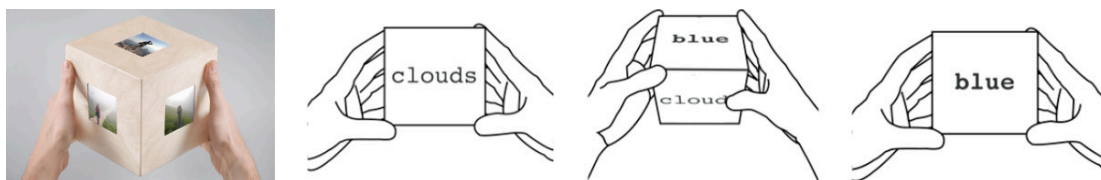


Figure 4.8: *CubeBrowser*. Cube dédié à la navigation de bases de données. Illustration extraite de (Zeller et Scherffig, 2009)

Tangible Spin Cube fonctionne de pair avec un visiocasque de réalité augmentée pour présenter une manière innovante et naturelle de naviguer à travers des me-

nus circulaires et rotatifs en tournant deux cubes joints (Figure 4.9). Plusieurs marqueurs (sur les cubes) permettent de positionner virtuellement les éléments du menu avec les technologies de réalité augmentée. Pour améliorer la précision et détection de la rotation des cubes entre eux, ces derniers intègrent des capteurs à effet Hall et mesurent les variations des champs magnétiques causées par des aimants placés sur les sommets des cubes (Lee et Woo, 2010).

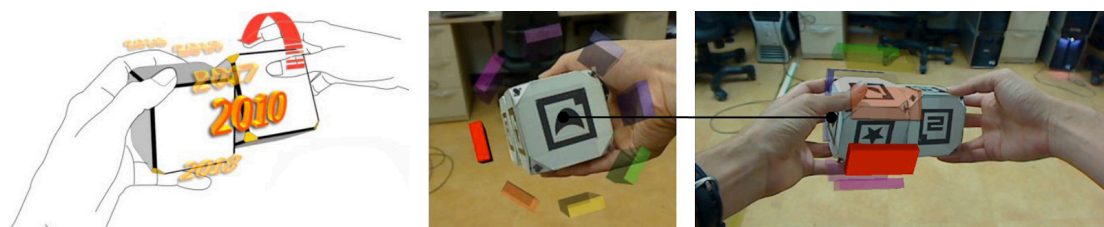


Figure 4.9: *Tangible Spin Cube*. Paire de cubes rotatifs. Illustration extraite de (Lee et Woo, 2010)

MediCubes représente un ensemble de cubes dédié aux contrôles médicaux en pédiatrie, le but étant de réduire l'anxiété des enfants liée aux examens en les faisant manipuler des cubes pour naviguer à travers une histoire réalisant des mesures physiologiques imperceptibles (Figure 4.10). Pour progresser dans l'histoire, les enfants sont invités à manipuler correctement les cubes au bon moment, chacun intégrant un capteur unique dédié à une mesure physiologique (par exemple la température ou les pulsations cardiaques). Les mesures sont enregistrées et accessibles sur une application mobile dédiée aux parents ou médecins (Vonach *et al.*, 2016).

Loaded Dice représente une paire de cubes dédiée aux activités de co-conception (d'appareils connectés) avec des aveugles et personnes malvoyantes (Lefeuvre *et al.*, 2016). Les deux cubes communiquent entre eux (Figure 4.11), l'un est composé de plusieurs capteurs pour l'entrée d'information (par exemple, pour mesurer la température, la lumière, le son, ou même détecter les mouvements et



Figure 4.10: *MediCubes*. Ensemble de cubes dédié aux contrôles médicaux. Illustration extraite de (Vonach et al., 2016).

distances) tandis que l'autre possède de nombreux actuateurs pour la sortie d'informations (par exemple, un haut-parleur, une surface chauffante, soufflante et vibrante).



Figure 4.11: *Loaded Dice*. Paire de cubes dédiée aux activités de co-conception. Illustration extraite de (Lefevre et al., 2016).

Par simplification, nous catégorisons *CubeLendar* (Figure 4.12) dans la navigation et exploration, car la manipulation (rotation) de cet appareil de forme cubique permet de suivre les prévisions météorologiques, la date et l'heure, mais aussi différents rendez-vous et réunions, que ce soit pour connaître leur nature (personnelle ou professionnelle), le nombre de personnes présentes, ou le temps restant avant l'évènement par l'intermédiaire de retours lumineux (Matviienko et al., 2016).

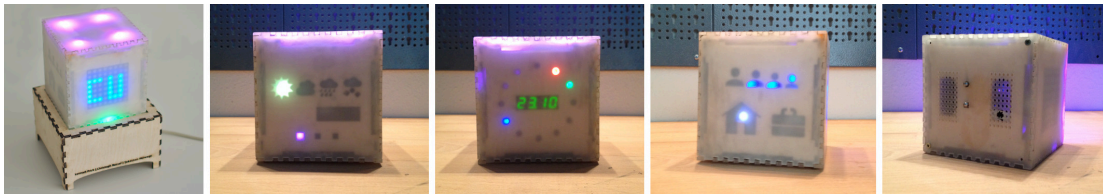


Figure 4.12: *CubeLendar*. Cube informant (date, heure, prévision météorologique) et notifiant (événements). Illustration extraite de (Matviienko *et al.*, 2016).

4.1.2 Manipulation tridimensionnelle

La représentation simple, accessible et tridimensionnelle de la forme cubique en fait un choix propice à la manipulation d'entités virtuelles évoluant dans un monde en trois dimensions, que ce soit pour des déplacements (translation), rotations ou déformations (mise à l'échelle).

3-D Shape Deformation est un cube interactif avec retour tactile et élastique, simplement déformable avec les mains (Figure 4.13). La déformation de l'appareil est synchronisée avec une forme virtuelle pour permettre une manipulation tridimensionnelle intuitive de cette dernière (Murakami et Nakajima, 1994).

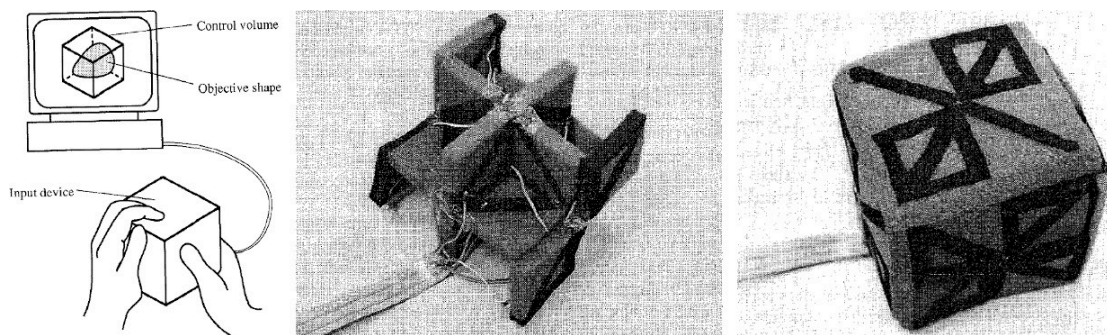


Figure 4.13: *3-D Shape Deformation*. Cube physiquement déformable. Illustration extraite de (Murakami et Nakajima, 1994)

Cubic Mouse est un cube interactif dédié à la spécification de coordonnées dans un environnement tridimensionnel. Le cube est traversé perpendiculairement par 3 barres, chacune dédiée à une dimension (Figure 4.14). L'utilisateur peut pousser ou tirer les barres pour déplacer une entité dans le monde virtuel. Douze boutons physiques (6 sur l'une des faces et 1 pour chaque extrémité des barres) permettent d'étendre le type de manipulation virtuelle au-delà du déplacement, pour réaliser par exemple des agrandissements ou rétrécissements (Fröhlich et Plate, 2000).

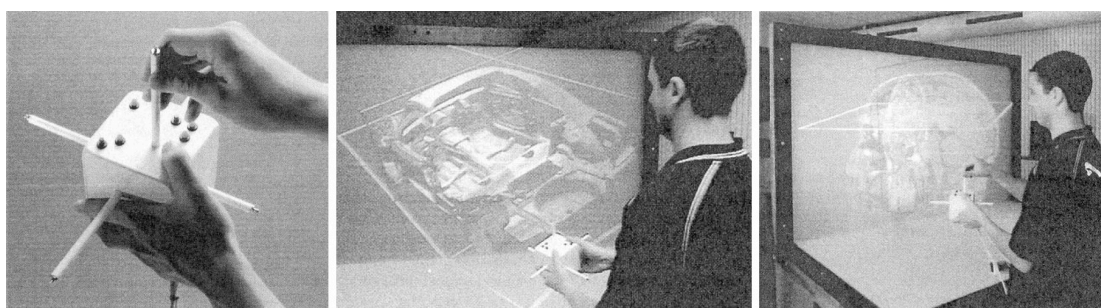


Figure 4.14: *Cubic Mouse*. Cube traversé par 3 barres et dédié aux environnements tridimensionnels. Illustration extraite de (Fröhlich et Plate, 2000)

CUBIK est aussi un cube extensible, chaque axe de l'appareil peut individuellement évoluer entre 4,5 et 6 pouces (soit 11,46 et 15,24 cm) (Figure 4.15). Dédié à la conception assistée par ordinateur (CAO), la manipulation du cube permet de changer les dimensions virtuelles d'une forme par sa transformation réelle, mais sa position et son orientation n'en seront pas automatiquement suivies et synchronisées (Lertsithichai et Seegmiller, 2002).

ActiveCube représente un ensemble de cubes rigides dédié à la construction et interaction tridimensionnelle. Lorsque les cubes sont assemblés entre eux (par emboîtement), la forme commune est retranscrite en temps réel sur un système informatique (Figure 4.16). Leur fonctionnalité dépasse le cadre de la manipulation tridimensionnelle, par exemple, la forme finale de l'assemblage peut être utilisée pour effectuer des requêtes dans une base de données ou explorer des histoires pour

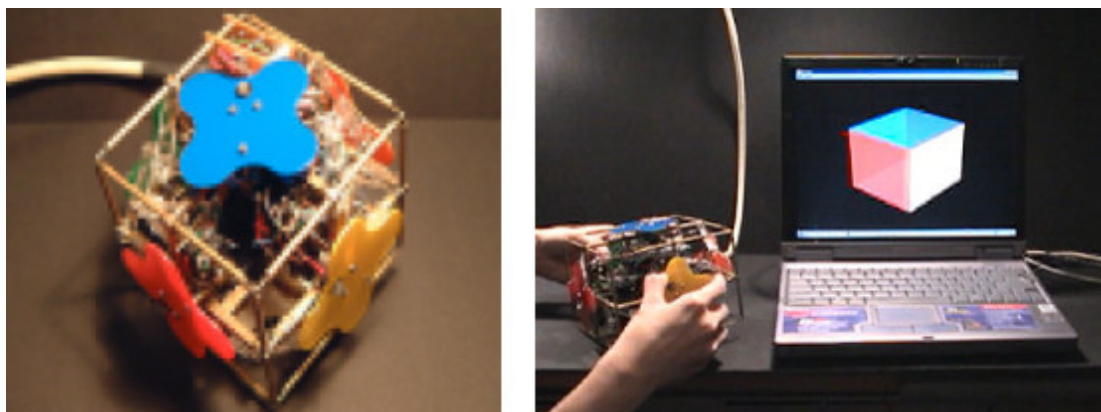


Figure 4.15: *CUBIK*. Cube extensible dédié à la conception assistée par ordinateur. Illustration extraite de (Lertsithichai et Seegmiller, 2002)

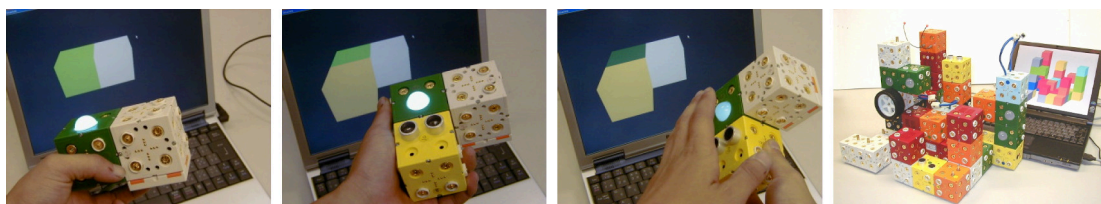


Figure 4.16: *ActiveCube*. Ensemble de cubes connectés à assembler. Illustration extraite de (Ichida *et al.*, 2004)

enfants, mais aussi pour mesurer les capacités cognitives spatiales des utilisateurs à travers le processus de construction (Ichida *et al.*, 2004).

CubTile est un cube imposant composé de 5 surfaces tactiles multicontacts, permettant notamment des manipulations tridimensionnelles avec une ou deux mains (Figure 4.17). Contrairement aux autres solutions, le cube reste fixe et les manipulations s'opèrent suivant la gestuelle effectuée avec les doigts sur les faces. Par exemple, des mouvements symétriques de deux doigts sur des faces opposées permettent de déplacer un objet virtuel (de la Rivière *et al.*, 2008).

pCubee est un cube offrant une manipulation et visualisation tridimensionnelle de contenus virtuels à l'aide de 5 écrans disposés sur des faces différentes (Figure 4.18)

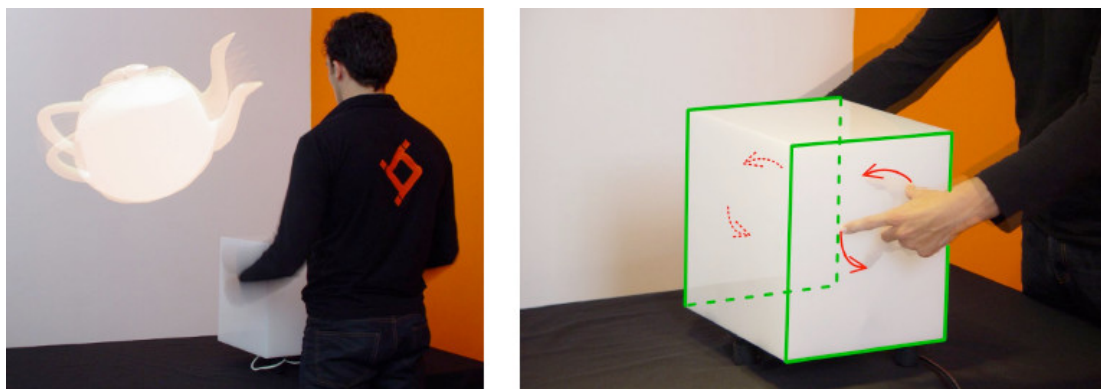


Figure 4.17: *CubTile*. Cube fixe composé de surfaces tactiles multicontacts. Illustration extraite de (de la Rivière *et al.*, 2008)

et d'un dispositif externe porté sur la tête de l'utilisateur pour situer ce dernier et adapter la visualisation en conséquence (Stavness *et al.*, 2010). Le cube agit comme un conteneur d'entités virtuelles (visuellement présentes à l'intérieur).

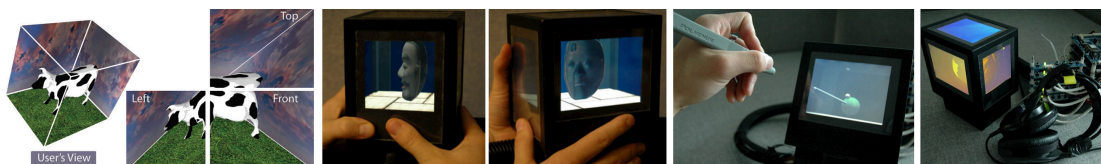


Figure 4.18: *pCubee*. Conteneur cubique d'entités virtuelles. Illustration extraite de (Stavness *et al.*, 2010)

CAPTIVE est un cube fonctionnant de pair avec un système de réalité augmentée. La structure du cube est très légère (aisément manipulable), composée seulement d'arêtes et sommets de couleurs spécifiques pour simplifier le suivi tridimensionnel (Figure 4.19). Tout comme le précédent appareil, ce cube est un conteneur d'entités virtuelles, la différence étant qu'elles sont ici représentées par l'intermédiaire du système de réalité augmentée (Chakraborty *et al.*, 2014).

Rubikon est un appareil cubique basé sur le mécanisme du Cube de Rubik (*Rubik's Cube*). Les surfaces de l'appareil sont composées de plusieurs carreaux déplaçables

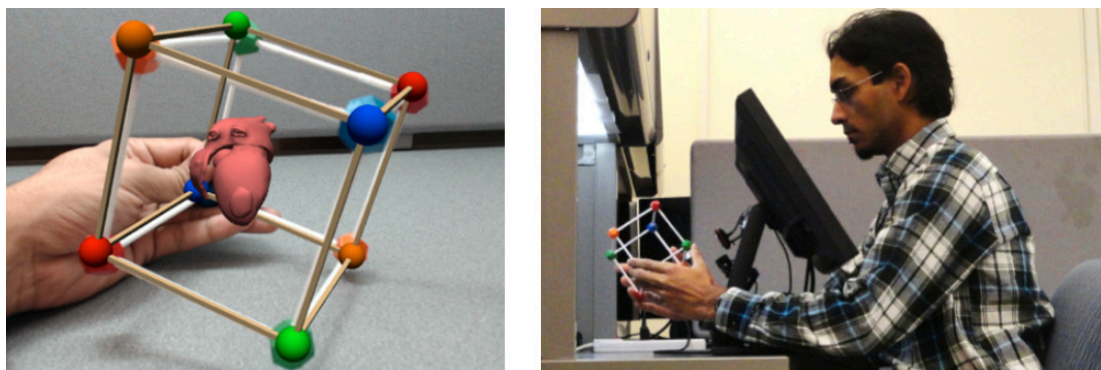


Figure 4.19: *CAPTIVE*. Conteneur cubique d'entités virtuelles par réalité augmentée. Illustration extraite de (Chakraborty *et al.*, 2014)

suivant une combinaison de mouvements, permettant notamment de manipuler (par rotation) des objets tridimensionnels (Figure 4.20). Le *Rubikon* peut aussi être catégorisé comme appareil générique dédié à la navigation dans des menus. Les auteurs ont par exemple proposé des scénarios pour basculer à travers différentes applications d'un système d'exploitation (Roudaut *et al.*, 2014).

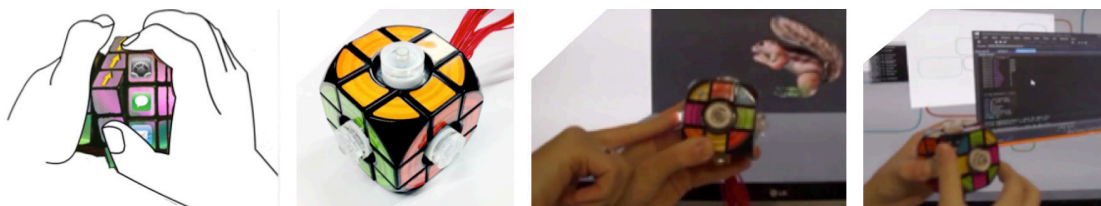


Figure 4.20: *Rubikon*. Cube basé sur le mécanisme du Cube de Rubik. Illustration extraite de (Roudaut *et al.*, 2014)

4.1.3 Apprentissage

La forme cubique est caractérisée par son aisance à être manipulé tout en gardant un attrait stimulant, engageant et ludique, plusieurs recherches profitent de cet avantage pour proposer des scénarios d'apprentissage, principalement envers les enfants. Nous décrivons ci-dessous 5 dispositifs cubiques orientés vers l'éducation.

Learning Cube est un cube composé de 6 écrans à cristaux liquides distribués sur chacune de ses faces, et d'un accéléromètre permettant de reconnaître les mouvements de l'appareil (Figure 4.21). Les auteurs ont implémenté un jeu de questions pour inciter les enfants à explorer les faces du cube et les aider à construire des représentations mentales de formes tridimensionnelles, et par extension à comprendre le monde physique qui les entoure (Terrenghi *et al.*, 2006).

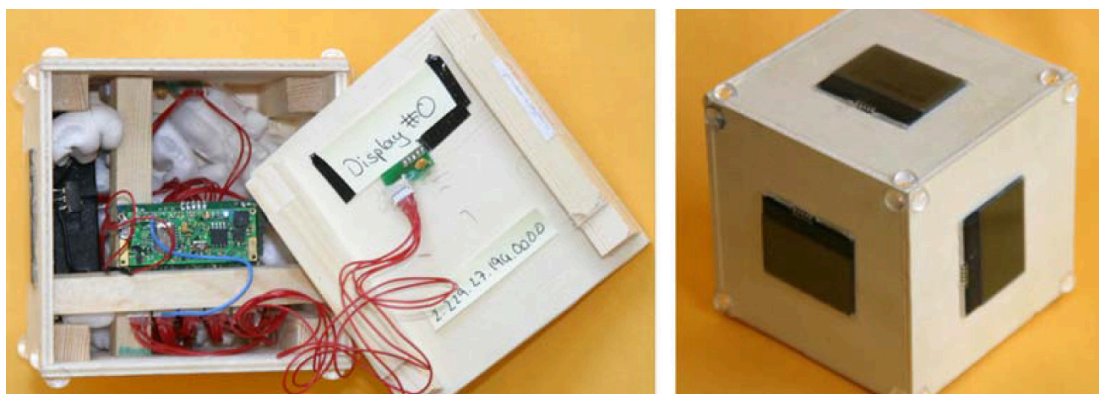


Figure 4.21: *Learning Cube*. Cube dédié à la construction de représentations mentales tridimensionnelles. Illustration extraite de (Terrenghi *et al.*, 2006)

i-Cube est un appareil cubique fonctionnant par groupe, chaque appareil est sensible à son entourage, l'orientation et l'état des facettes (tel que les motifs visuels et couleurs) des autres *i-Cubes* à proximité (Figure 4.22). Les auteurs ont implémenté plusieurs scénarios, dont un dédié à l'apprentissage de l'orthographe en ordonnant les cubes avec des codes couleur (Goh *et al.*, 2012).

Les *Sifteo Cubes*, basés sur les recherches des Siftables (Merrill *et al.*, 2007), reprennent le concept de manipulation et assemblage de plusieurs cubes en mettant l'accent sur l'aspect multi-utilisateur (Figure 4.23). Chaque cube dispose d'un écran et d'une technologie de communication permettant de programmer plusieurs scénarios, notamment des jeux éducatifs (Merrill *et al.*, 2012). Les *Sifteo Cubes* ont aussi été utilisés pour naviguer à travers des bibliothèques musicales

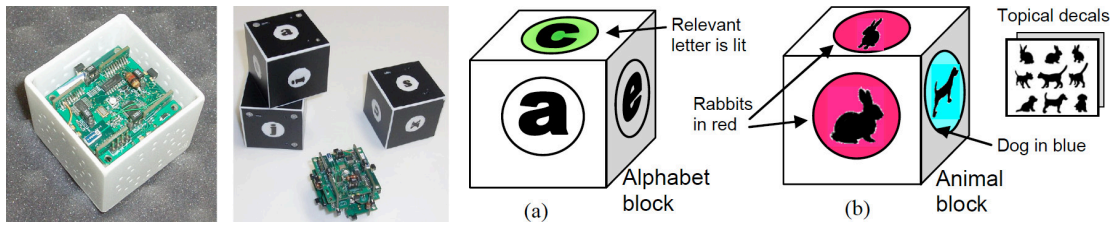


Figure 4.22: *i-Cube*. Ensemble de cubes connectés intégrant des scénarios d'apprentissage.

Illustration extraite de (Goh *et al.*, 2012)

en exploitant les arrangements et alignements spatiaux (Langner *et al.*, 2014).

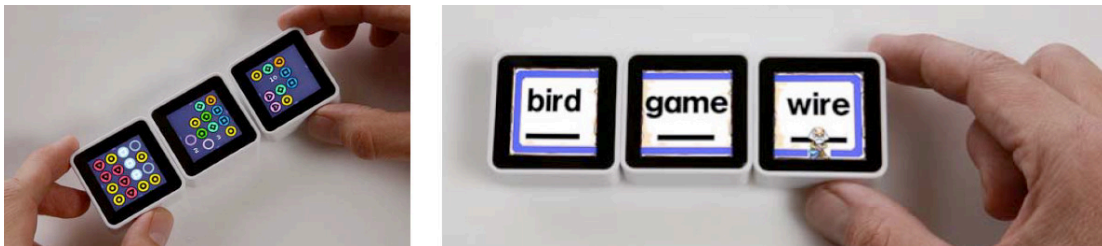


Figure 4.23: *Sifteo Cubes*. Ensemble de cubes connectés et programmables. Illustration extraite de (Merrill *et al.*, 2012)

Cube-in est un ensemble de cube dédié à l'apprentissage de l'informatique et électronique (Figure 4.24). Les utilisateurs peuvent étudier et examiner les concepts d'entrées et sorties ou des signaux analogiques et numériques, en manipulant des cubes simples (structure en papier) dotés d'une seule caractéristique à imbriquer dans un cube récepteur (Oh et Gross, 2015).

Par simplification, nous catégorisons *CUPA* dans l'apprentissage, car ce dernier est dédié au développement de l'intelligence émotionnelle des enfants et de leur relation parentale (Figure 4.25). Le cube est accompagné d'une application mobile (pour les parents) et intègre plusieurs scénarios liés au réveil, au coucher (avec des fondus de musiques et couleurs) ou encore des exercices de respiration en plaçant le cube entre les mains de l'enfant pour mesurer ses pulsations cardiaques (Liew,

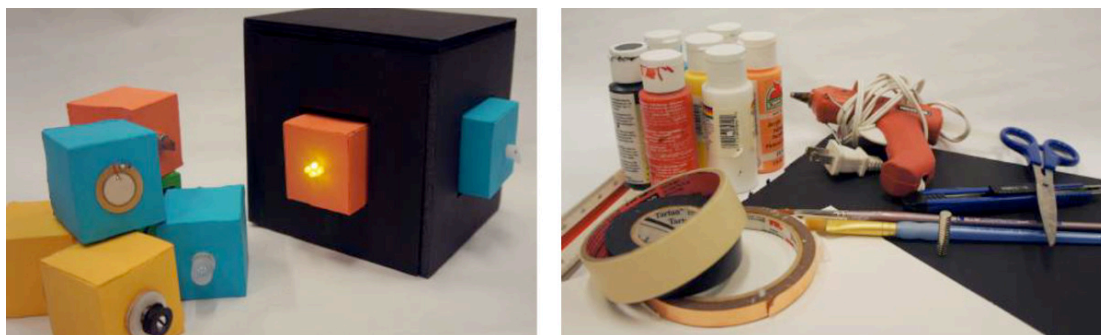


Figure 4.24: *Cube-in*. Ensemble de cubes dédié à l'apprentissage de l'informatique et électronique. Illustration extraite de (Oh et Gross, 2015)

2017).

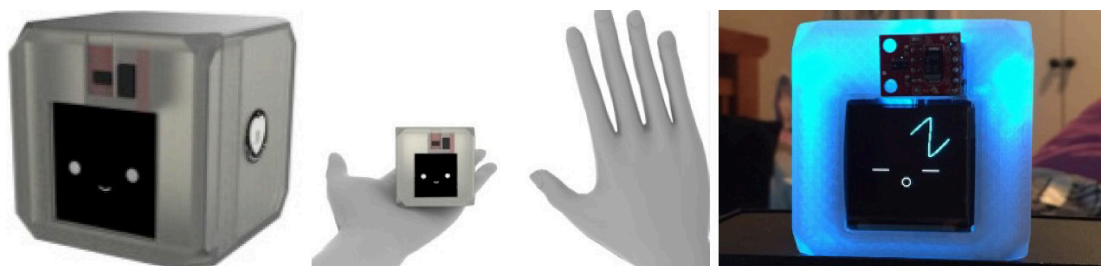


Figure 4.25: *CUPA*. Cube dédié au développement de l'intelligence émotionnelle des enfants. Illustration extraite de (Liew, 2017)

4.1.4 Analyse et résumé

Bien qu'aucun des appareils cubiques présentés ne fut consacré à la saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée, nous considérons le cube comme une forme propice à cette tâche pour plusieurs raisons :

- **Usage étendu.** À l'instar de notre solution ControlWear permettant d'activer des boutons virtuels par un simple appui pour naviguer à travers les menus d'une quelconque application, nous estimons que l'appareil cubique se doit d'être compatible (et même de faciliter) son utilisation pour d'autres

tâches ou activités. La saisie de texte représente une tâche qui n'est jamais seule, elle nécessite souvent d'avoir atteint un champ (ou zone) d'édition de texte, par exemple en naviguant à travers diverses interfaces visuelles, une tâche qui fut justement exploitée par la première catégorie des appareils cubiques : exploration et navigation. De plus, la seconde catégorie a montré à de nombreux égards l'utilité de la forme cubique pour la manipulation tridimensionnelle, que ce soit pour des déplacements, rotations, mise à l'échelle et constructions d'entités virtuelles, représentant une caractéristique particulièrement adaptée, voire même nécessaire aux contextes de réalité augmentée dans lequel se situent nos travaux.

- **Réalité augmentée.** Plusieurs appareils cubiques ($n = 5$) ont été conçus pour des expériences de réalité augmentée.
- **Environnement de bureau.** Plusieurs appareils cubiques ont été conçus pour un environnement de travail de bureau, explicitement (par exemple, lorsqu'il s'agissait de notification de réunion de travail, au bureau) ou implicitement par les activités et les tâches auxquels les appareils furent dédiés (par exemple pour la CAO). Les appareils de forme cubique présentent aussi une caractéristique multi-utilisateur, par leur aisance à être partagés pendant des réunions ou ateliers de co-conception.

Par ailleurs, avant de présenter en détail le concept et l'implémentation du key-cube, nous mentionnons ci-après certains travaux de recherche allant au-delà des limites de l'état de l'art spécifique aux appareils de forme cubique, mais suffisamment proche pour montrer les avantages à adopter cette forme.

- *Claviers séparés et verticaux.* Les claviers traditionnels ont parfois été modifiés pour offrir davantage de confort, le plus souvent en réalisant une coupure du clavier en deux parties égales, permettant notamment de modifier l'espacement, l'orientation et l'inclinaison des mains (Honan *et al.*,

1995; Smith *et al.*, 1998; Rempel, 2008). Lorsque l'inclinaison des deux parties du clavier atteint 90 degrés (par rapport au plan horizontal, tel que la surface d'un bureau), il s'agit de claviers verticaux (Figure 4.26, gauche). Plusieurs études ont montré que ces types de claviers permettaient d'adopter des positions du corps plus naturel (neutre) et causaient moins d'effort sur certains muscles susceptibles de lésions attribuables au travail répétitif (troubles musculosquelettiques) sans avoir à sacrifier significativement les performances de production telles que la vitesse de saisie de texte et le taux d'erreur (Muss et Hedge, 1999; Van Galen *et al.*, 2007). Cependant, les claviers séparés et verticaux partagent le même défaut que les claviers traditionnels, ils nécessitent une structure plane ou fixe pour une utilisation relativement immobile.

- *RearType*. Il s'agit d'une interface utilisant les techniques de séparation et d'inclinaison verticales pour disposer les touches d'un clavier sur la face arrière d'une tablette (Figure 4.26, droite). Les auteurs ont exploité le transfert des connaissances en adoptant la disposition QWERTY. Les participants d'une étude utilisateurs, tous experts en saisie de texte avec un clavier traditionnel en utilisant les 10 doigts, ont atteint 15,1 mots par minute après une heure d'entraînement, représentant 20,9 % de leur vitesse avec un clavier traditionnel. Cependant, l'interface *RearType* ne propose pas le même nombre de touches qu'un clavier traditionnel et nécessite une tablette de taille relativement importante.



Figure 4.26: Clavier vertical (gauche) et *RearType*, clavier à l'arrière d'une tablette (droite). Illustrations extraites de (Van Galen *et al.*, 2007; Scott *et al.*, 2010)

4.2 Conception et implémentation de l'interface Keycube

Le keycube est similaire à un clavier traditionnel, mais de forme cubique, facile à attraper et tenir, suffisamment petit pour être couvert par les mains. La forme du keycube permet à l'appareil de partager entre autres, le même nombre, et la même taille de touche qu'un clavier traditionnel, tout en offrant une certaine liberté de déplacement et de posture à l'utilisateur.

Les premières implémentations du concept sont des appareils électroniques de type périphérique, connectés à un outil informatique *hôte* (par exemple un visio-casque de réalité augmentée, un téléphone intelligent ou un ordinateur personnel). Néanmoins, les prototypes du keycube ne sont pas encore de type « brancher et utiliser » (*Plug and Play*), ils ne sont pas automatiquement reconnus par les systèmes d'exploitation des *hôtes*, et nécessite un logiciel ou une application dédiée. Par conséquent, nous présenterons dans cette section, une partie matérielle et une partie logicielle.

Cette section a fait l'objet d'une protection de propriété intellectuelle formelle (brevet en instance) puis d'une publication scientifique (Brun *et al.*, 2019).

4.2.1 Matériel

Le keycube est caractérisé par nos considérations de conception principales : la proximité (ou similitude) avec le clavier traditionnel et la mobilité. À cet égard, nous avons établi plusieurs critères :

- Un nombre de touches similaire avec les claviers traditionnels, pour éviter d’avoir à implémenter des combinaisons peu conventionnelles.
- Une taille des touches similaire aux claviers traditionnels.
- Un espacement entre les touches similaire aux claviers traditionnels.
- Une liberté d’utilisation des doigts (possibilité d’écrire avec un ou plusieurs doigts).
- Une liberté du regard (possibilité de saisir du texte en regardant ou non l’appareil).
- Une taille globale de l’appareil suffisamment petite pour qu’il puisse être couvert par les deux mains.

Ainsi, nous avons choisi d’implémenter des matrices de 16 touches (4x4) sur 5 faces, soit un total de 80 touches, une quantité similaire à celle des claviers traditionnels dépourvus d’un pavé numérique. La structure principale de l’appareil est imprimée en 3D et mesure 85 x 85 x 85 mm (Figure 4.27, gauche), les touches augmentent la taille totale du keycube à 96,2 x 96,2 x 90,6 mm.

La taille des matrices et de la structure ont été définies en partant de celle des touches et de leur espacement préconisés selon une série de trois études (Pereira *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2014; Madison *et al.*, 2015). Les auteurs ont montré qu’un espacement entre les touches (calculé à partir de leur centre) entre 17 et 19 mm était significativement meilleur pour la productivité et utilisabilité qu’un espacement d’environ 15,5-16 mm. Leur résultat est cohérent avec les recommandations de l’Organisation Internationale de Normalisation (ISO) préconisant un

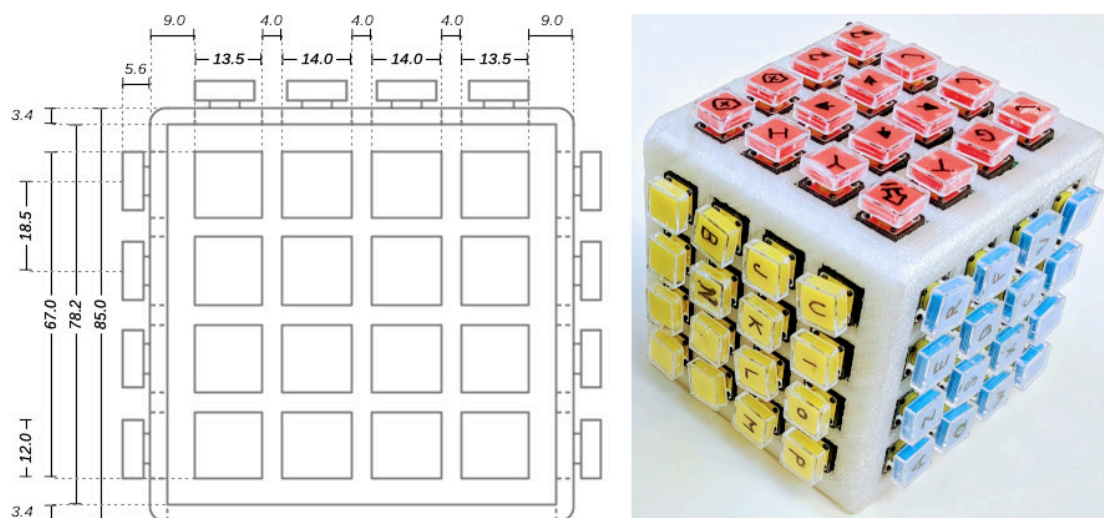


Figure 4.27: Taille de la structure du keycube, à gauche, et aperçu d'un prototype final à droite.

espacement des touches de 19 ± 1 mm pour les claviers traditionnels (International Organization for Standardization, 2008). Les auteurs ont aussi montré que pour un même espacement (de 17 mm), la précision (de saisie de texte) était meilleure avec des surfaces de touches plus petites entre 11 et 12 mm qu'avec des surfaces entre 15 et 16 mm. En nous appuyant sur ces résultats, les touches des matrices du keycube ont une surface de 12 mm pour un espacement (autant horizontalement que verticalement) d'environ 18,5 mm. De plus, un espace externe (bordure) d'environ 9 mm a été ajouté à chacune des matrices, augmentant la surface des arêtes de la structure du cube. Celles-ci atteignent 16,5 mm en incluant un arrondi (rayon de 3,4 mm) pour faciliter la tenue (largeur des index d'un adulte entre 15 et 20,3 mm) et le confort de l'appareil dans la paume des mains (Sheridan *et al.*, 2003). Avant de réaliser les impressions 3D, des cubes vierges en papier et carton ont été réalisés et testés en interne (seulement par les auteurs de l'appareil) pour vérifier que la taille de la structure était suffisamment petite pour être couverte et manipulée par les deux mains. Nous n'avons pas trouvé d'études

utilisateurs comparant les arrangements de touches d'une manière ortholinéaire (alignée horizontalement et verticalement suivant des axes perpendiculaires ou parallèles) ou échelonnée (le plus courant, les touches sont alignées légèrement en quinconce). Les touches du keycube sont disposées ortholinéairements pour des raisons de faisabilité (Figure 4.28).

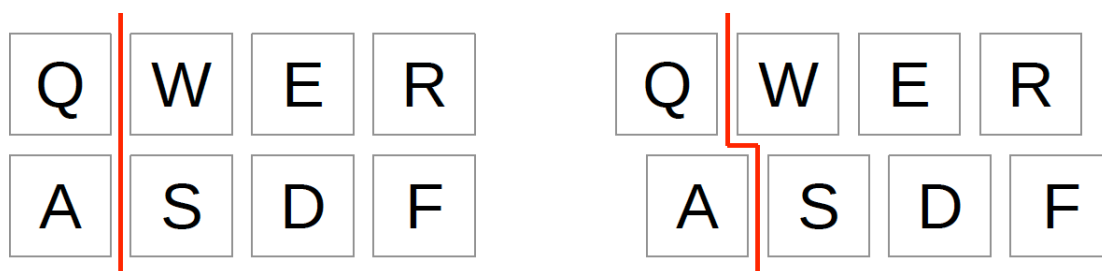


Figure 4.28: Arrangement d'une disposition ortholinéaire, à gauche, et échelonnée à droite.

Pour limiter les appuis non désirés de touches pendant la manipulation de l'appareil, la force d'activation de ces dernières est légèrement rehaussée entre 1 N et 3 N vis-à-vis des préconisations de l'ISO pour un clavier traditionnel, entre 0,5 N et 0,8 N (International Organization for Standardization, 2008). Le prototype du keycube a des capuchons de touches colorées distribués par face (rouge, vert, bleu, jaune et blanc) pour aider les représentations mentales tridimensionnelles de l'appareil par les utilisateurs. Des couvercles transparents et optionnels (mais inclus dans la taille de la surface des touches) permettent d'inscrire le caractère sur chacune des touches et de faciliter ainsi leur déplacement, dans le cas d'une disposition des caractères personnalisée.

L'unique face dépourvue de touches permet :

1. De donner un point de repère tactile distinctif en cassant une symétrie axiale, ainsi, les utilisateurs sont capables de reconnaître le dessus du dessous, sans avoir à regarder l'appareil.
2. De disposer d'une face (plane) convenable pour déposer l'appareil.

3. D'inclure une surface tactile interactive (de type pavé tactile).

En effet, au-delà des touches, le prototype du keycube (Figure 4.27, droite) intègre d'autres composants :

- Un écran tactile pour simuler un dispositif de pointage ou pour disposer de boutons (ou d'autres contrôles) virtuels personnalisables et variant suivant l'application de l'hôte en cours, par exemple pour saisir des émoticônes, éditer du texte (le style) ou changer de musique, etc.
- Une centrale inertielle (6 degrés de liberté avec un accéléromètre et gyroscope) pour reconnaître les mouvements de l'appareil.
- Un moteur vibreur pour exploiter des retours tactiles supplémentaires lors d'expériences de réalité augmentée ou même virtuelle (par exemple, lors d'un appui sur l'écran tactile ou pour simuler une collision entre le keycube et une entité virtuelle).
- Un module Bluetooth pour une connexion sans fil (un port USB Micro-B reste disponible et accessible sur la face plane de l'appareil pour une connexion filaire).

De plus, le keycube dispose d'une batterie (rechargeable), d'un interrupteur (d'alimentation) et d'un microcontrôleur (ATmega2560 intégré sur une carte Arduino), pour un poids total de l'appareil de 430 grammes.

Par ailleurs, 80 diodes ont été affectées à chacune des touches, afin de supprimer des problèmes courants liés aux matrices lorsque l'utilisateur effectue des appuis simultanés : *masquage* (une ou plusieurs touches appuyées ne sont pas reconnues) et *fantôme* (une ou plusieurs touches sont reconnues sans être appuyées). Le keycube a virtuellement un roulement n-touches, signifiant que chacune des touches sera détectée correctement peu importe le nombre d'appuis simultanés. Nous ne décrirons pas de détails supplémentaires sur l'ensemble du circuit électronique ni sur le placement de chacun des nombreux composants (ayant requis plusieurs

itérations), cependant nous offrons un aperçu du circuit et une vue en éclaté (modélisation) des composants principaux du keycube dans les annexes respectives B.1 et B.2.

4.2.2 Logiciel

La partie logicielle est composée d'un programme exécuté sur le microcontrôleur du keycube et d'une application fonctionnant sur les appareils hôtes (de type ordinateur personnel ou téléphone intelligent).

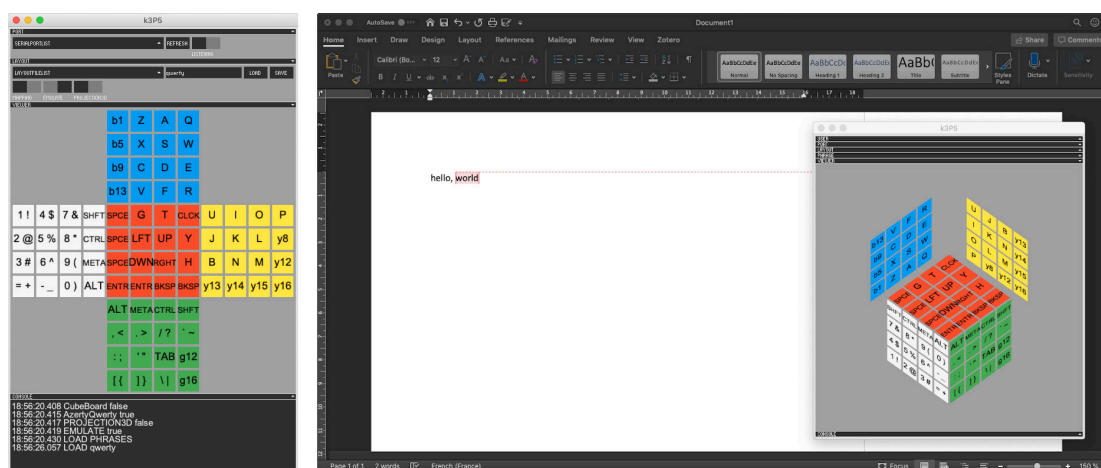


Figure 4.29: Capture d'écran du logiciel dédié au keycube (à gauche) et capture d'écran d'un logiciel de traitement de texte traditionnel (Microsoft Word) avec par-dessus le visualiseur du keycube (à droite).

- **Microcontrôleur.** Le nombre de touches étant supérieur au nombre de broches d'entrée/sortie du microcontrôleur permettant de lire les signaux électriques, nous avons implémenté un système de multiplexage (exécuté à environ 1,7 kHz) afin de passer plusieurs informations sur un même support de transmission (broche). Le programme gère en outre l'envoi des informations par communication série aux appareils hôtes sous forme de code alphanumérique autant par Bluetooth que par USB.

- **Hôte.** Une application pour ordinateurs personnels (Figure 4.29, gauche) et une application pour téléphones intelligents (Android) ont été conçues afin de réceptionner les codes alphanumériques du keycube, puis de les interpréter comme des appuis ou relâchements des touches et simuler ces événements au système d’exploitation ou aux champs de texte de l’application. Nous n’avons pas suivi de protocole USB-HID (*Human Interface Device*) spécifique aux claviers traditionnels afin d’avoir plus de flexibilité en termes de personnalisation et transmission de données des autres capteurs (tels que ceux de la centrale inertielle). Ainsi, l’application pour ordinateur personnel proposait aussi (1) un retour visuel symbolique et interactif (appelé visualiseur) du keycube au-dessus de toutes autres applications pour éventuellement aider la saisie de texte (voir l’exemple sur la Figure 4.29, à droite) et (2) la personnalisation à la volée (par l’utilisateur) de la disposition des caractères, de même que l’enregistrement ou chargement d’autres dispositions prédéfinies.

À l’égard des deux derniers points, en particulier pour la conception d’une disposition des caractères par défaut, nous avons mené deux études utilisateurs : (1) saisie de l’appareil, (2) accessibilité et préférence.

4.3 Étude utilisateurs 1 : saisie de l’appareil

Par une approche inspirée de la co-conception, le but de la première étude était de faire ressortir la position de saisie préférée du keycube par les utilisateurs. Tenir l’appareil d’une certaine manière ou d’une autre affecterait la disposition des caractères qui en suivrait, les touches étant plus ou moins accessibles par les doigts dépendamment de la position choisie. Nous avons mené une étude exploratoire, avec une partie de manipulation libre puis guidée.

4.3.1 Participants

Trente et un participants ont été recrutés (2 gauchers ; 15 femmes, 16 hommes ; entre 23 et 53 ans, 31 en moyenne) principalement sur les campus universitaires de l'IUT de Laval (Le Mans Université) et dans les bureaux montréalais de l'Université TÉLUQ. Tous les participants ont déclaré utiliser quotidiennement un clavier traditionnel, environ un quart en le regardant pour chaque appui de touche, la moitié en regardant uniquement les caractères spéciaux et le dernier quart, sans le regarder. L'habitude d'utilisation de manettes de jeux vidéo est divisée en tiers entre les participants les utilisant toutes les semaines, ponctuellement, puis jamais.

4.3.2 Matériels et logiciels

Nous avons utilisé un prototype du keycube neutre (sans inscription des caractères), les touches étant dépourvues de leurs couvertures transparentes (Figure 4.30, gauche). Par conséquent, la taille de leur surface était diminuée de 2 mm (soit 10 x 10 mm pour chaque touche). Chacune des touches correspondait à un code alphanumérique (première lettre de la couleur, suivie d'un nombre entre 1 et 16) sans signification pour les participants. Le keycube était connecté par Bluetooth à un ordinateur portable pour l'ensemble de l'expérimentation, à l'exception du premier participant (à la suite d'un problème de connexion). Un logiciel conçu avec l'environnement de développement et librairie graphique Processing montrait une disposition cubique bidimensionnelle dynamique (Figure 4.30, droite) faisant ressortir visuellement chacune des touches appuyées en temps réel puis inscrivait dans un champ de texte leur code alphanumérique respectif.

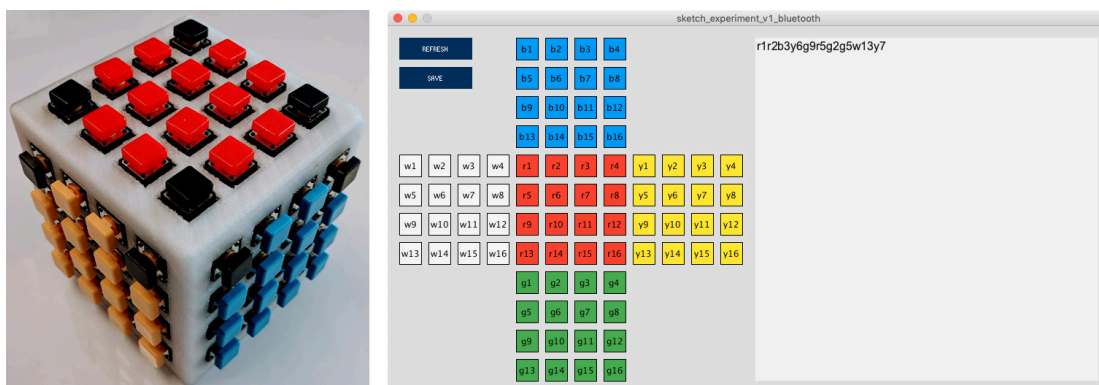


Figure 4.30: Prototype du keycube (gauche) et logiciel pour l'étude utilisateurs 1 (droite) intégrant une disposition cubique bidimensionnelle dynamique.

4.3.3 Procédure

Les participants étaient introduits à la procédure expérimentale individuellement puis commençaient par manipuler librement le prototype du keycube pendant 5 minutes avec comme seules instructions : (1) d'imaginer utiliser l'appareil dans un contexte de saisie de texte intensif, par exemple pour écrire un rapport, une lettre ou un long courriel, (2) d'essayer, autant que possible, différentes manières de tenir et manipuler l'appareil et (3) d'appliquer la méthode de la pensée à voix haute (dire ce que l'on pense, *think-aloud protocol*). Les participants étaient libres d'utiliser le bureau (support de l'ordinateur portable connecté au keycube) et la chaise mis à leur disposition et pouvaient tout autant se lever ou se déplacer. Cette étape de manipulation était enregistrée à l'aide d'une caméra (l'instructeur pointant seulement l'appareil puis les bras et mains des participants). Ensuite, pour s'assurer que les participants exploraient suffisamment de positions, l'instructeur présentait un ensemble de positions prédéfinies à essayer, concernant autant des variations de la position du corps que celle des mains ou de l'appareil (Figure 4.31). Après quoi, l'instructeur prenait des photos de la position préférée des participants pour tenir l'appareil en étant debout puis en étant assis. Les participants

finissaient par remplir un questionnaire (Annexe D.4) sur leurs compétences (liées à la saisie de texte) et données démographiques en incluant les mesures de leurs mains (circonférence, longueur et écart) effectuées par l'instructeur. Le questionnaire demandait ensuite de classer par ordre d'importance des caractéristiques de l'appareil (Figure 4.32) toujours en considérant une utilisation de saisie de texte. Les caractéristiques ont été définies en interne et sont affectées par (ou affectent) la saisie de l'appareil. Pour finir, des questions ouvertes étaient posées en vue d'améliorer le prototype du keycube. L'expérimentation a duré environ 35 minutes par participant.

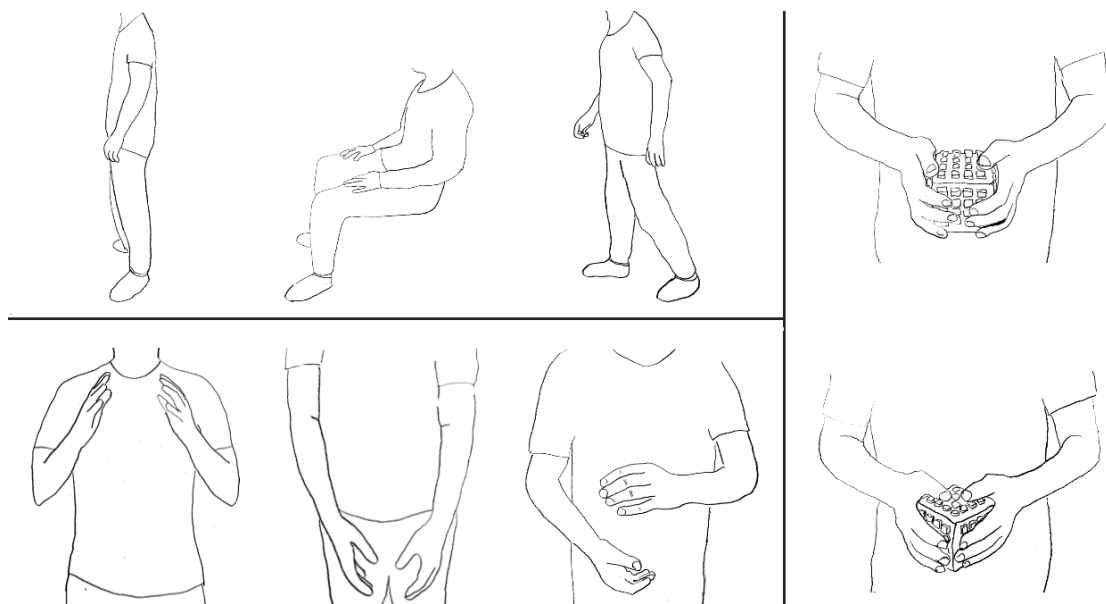


Figure 4.31: Ensemble de positions à essayer : corps (debout, assis, en marchant), bras (pliés, relâchés, sens dessus dessous), appareil (de face, en diagonale).

4.3.4 Résultats

Les résultats proviennent de l'analyse des réponses au questionnaire, des enregistrements audiovisuels, des photographies et des notes de l'instructeur.

4.3.4.1 Classement des caractéristiques du keycube

Les moyennes (et intervalles de confiance à 95 %) du classement des caractéristiques de l'appareil sont présentées sur la Figure 4.32. Deux caractéristiques sont considérées comme les plus importantes dans un contexte de saisie de texte : le *Nombre de touches directement accessibles* et le *Confort général*. Les caractéristiques *Nombre de touches apparentes* et la *Facilité à déposer l'appareil* sont classées parmi les moins importantes, ceci peut laisser supposer que les participants imaginaient utiliser l'appareil (lors d'une saisie de texte) sans le regarder et en le tenant dans les mains sans le déposer (cohérent avec les positions préférées).

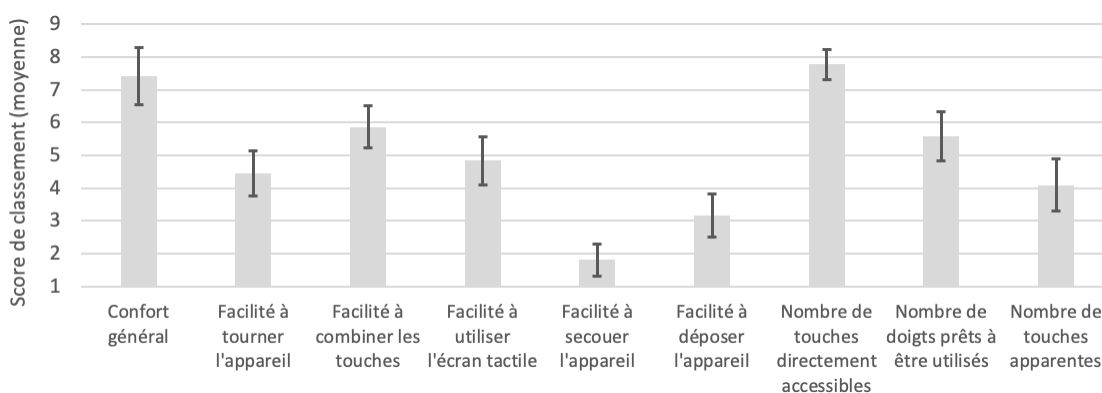


Figure 4.32: Classement par importance des caractéristiques (1 = la moins importante, 9 = la plus importante) rapportées par leur moyenne (accompagnée de l'intervalle de confiance à 95 %).

4.3.4.2 Positions préférées du keycube

Deux positions de saisie de l'appareil préférées ont émergé de l'expérimentation, que ce soit en étant debout ou assis : (1) *en diagonale* et (2) *de face* (Figure 4.33). Dans les deux cas, l'appareil était saisi à deux mains, les avant-bras légèrement fléchis, l'écran tactile de l'appareil dirigé vers le bas. Les deux stratégies adoptées pour empêcher l'appareil de tomber sont (1) le placement des auriculaires (voire

même des annulaires) sous la surface plane (dessous), ou (2) d'accentuer la pression des paumes des mains contre les arêtes latérales de l'appareil (uniquement possible avec la position *en diagonale*, sous peine d'appuyer sur de nombreuses touches par inadvertance dans la position *de face*).

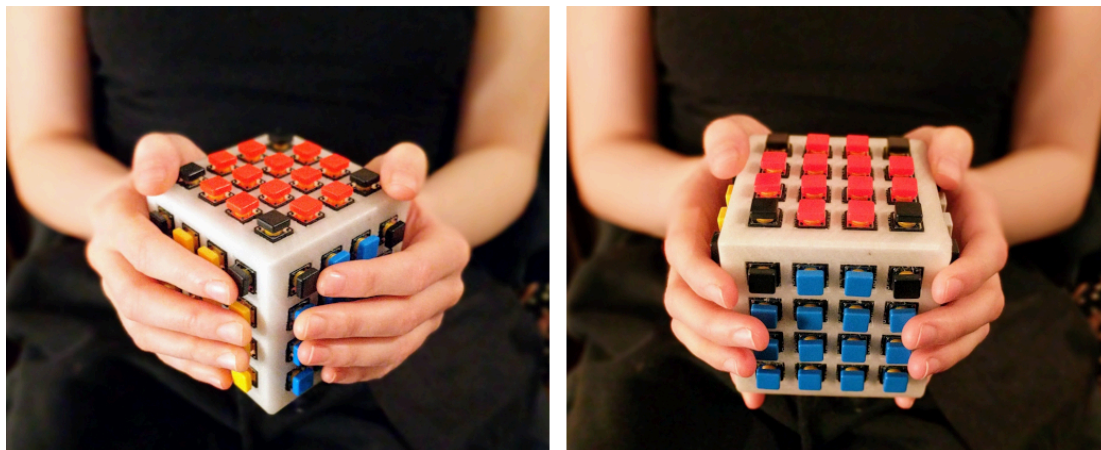


Figure 4.33: Principales positions préférées de saisie de l'appareil, *en diagonale* (choisi à 77,4 %) à gauche et *de face* à droite.

Nous pensons que la disposition cubique bidimensionnelle du logiciel (Figure 4.30, droite) a créé un biais en rendant plus facile la correspondance de la représentation mentale des touches réelles vers leur représentation virtuelle lorsqu'on tient le cube dans sa position *de face*. Par conséquent, la position *en diagonale* a été découverte par les participants eux-mêmes (durant la manipulation libre) seulement 4 fois (12,9 %). Pour autant, après avoir effectué l'ensemble des positions demandées (Figure 4.31), la position *en diagonale* fut finalement préférée à 77,4 %. Cette position est cohérente avec celle relevée par une précédente étude sur l'affordance des cubes lors de manipulations bimanuelles (Sheridan *et al.*, 2003). Par ailleurs, 6 participants ont tenu le keycube d'une manière différente suivant la position de leur corps (debout ou assis), 25 participants ont choisi la position *en diagonale* en étant assis et 23 en étant debout. Trois participants ont préféré avoir l'écran tactile

dessus, plus accessible pour les pouces et jugeant la face du dessous suffisamment accessible par appuyer sur les touches avec les auriculaires. Un seul participant a préféré une position entièrement différente, avec la main dominante dessous et l'autre main par-dessus (similaire à la position *sens dessus dessous* de la Figure 4.31).

4.3.4.3 Remarques générales

L'ensemble des remarques générales provient uniquement des commentaires à voix haute ou des réponses aux questions ouvertes.

Cinq participants ont trouvé très intéressant et même plus facile de tenir l'appareil en étant debout ou en marchant. Nous pensons que cela est dû à la position adoptée pendant le déplacement, les bras se détendaient, la face du dessous de l'appareil venait contre le corps, et les stratégies pour maintenir l'appareil ne sont plus nécessaires, naturellement l'ensemble ou les bouts des doigts suffisent à l'empêcher de tomber (Figure 4.34).

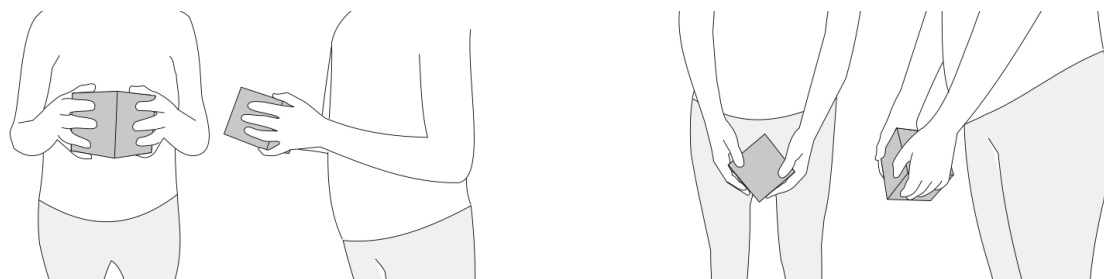


Figure 4.34: Position de saisie de l'appareil avec les avant-bras fléchis et les auriculaires dessous pour empêcher la chute (à gauche) et avec les bras détendus, l'appareil retenu par l'ensemble des doigts (à droite).

Sept participants ont utilisé le prototype du keycube en le considérant comme un appareil de pointage de type souris, du côté de la surface plane, ils déplaçaient l'appareil en le faisant glisser sur le bureau pour simuler le déplacement d'un curseur. Les couleurs ont été appréciées par 6 participants, les aidant à définir mentalement les faces de l'appareil. À cet égard, 2 participants ont suggéré l'appareil comme idéal pour les enfants et deux autres participants ont relevé un effet déstressant, après avoir vigoureusement appuyé sur de nombreuses touches. Deux participants ont pensé utiliser l'appareil pour faire du sport en le déplaçant en l'air (en effectuant des gestes proches des étirements et entraînements de yoga), tandis que six participants ont comparé l'appareil à un instrument de musique, en particulier l'accordéon. La forme du keycube a incité les participants à vouloir partager l'appareil et à l'utiliser pour collaborer avec des collègues de travail ou amis. Cependant, un participant a noté le rapport de proximité du keycube avec le corps lorsqu'on le tient et a apprécié « *la relation personnelle intime offerte par l'appareil* ».

Finalement, les participants ont rapporté plusieurs potentielles améliorations de l'appareil, telles qu'une réduction légère du poids ($n = 12$) et de la taille ($n = 5$). Ils ont aussi relevé le besoin d'avoir un support physique complémentaire ($n = 9$) ou un moyen de faire tenir l'appareil aux mains, par exemple, une dragonne ($n = 4$) car ils ont mentionné avoir peur de faire tomber l'appareil ($n = 8$) mais aussi pour se libérer facilement les mains. Cinq participants ($n = 5$) voulaient des supports (bordures au niveau des arêtes de l'appareil) plus larges pour la paume de leurs mains ou alors légèrement diminuer le nombre de touches pour éviter les appuis accidentels (faux positif) durant la manipulation ($n = 11$).

4.4 Étude utilisateurs 2 : accessibilité et préférence

Après avoir fixé une position initiale pour saisir l'appareil (*en diagonale* car préférée à 77,4 % lors de la première étude), toujours dans l'objectif de concevoir une disposition cubique des caractères, nous avons mené une étude utilisateurs pour mesurer l'accessibilité et la préférence des touches vis-à-vis des doigts des utilisateurs.

4.4.1 Participants

Nous avons recruté 22 participants (20 droitiers, 2 gauchers, tous leurs doigts étaient fonctionnels ; 14 femmes, 8 hommes ; entre 23 et 43 ans, 31 en moyenne) principalement du campus universitaire de l'IUT de Laval (Le Mans Université) et des bureaux montréalais de l'Université TÉLUQ. Treize ont participé à la précédente étude (avec un délai minimum de 4 semaines entre les deux). Tous les participants ont déclaré utiliser un clavier traditionnel tous les jours.

4.4.2 Matériels et logiciels

Nous avons utilisé le même matériel que pour la première étude utilisateurs (un prototype du keycube neutre, avec des codes alphanumériques affectés aux touches était connecté par Bluetooth, à un ordinateur portable). Un nouveau logiciel conçu avec Processing (Figure 4.35) montrait une disposition dynamique cubique avec une vue orthogonale axonométrique pour simplifier la représentation mentale lorsque le cube est tenu dans la position *en diagonale*, des mains symboliques accompagnaient l'interface visuelle pour guider l'utilisateur.

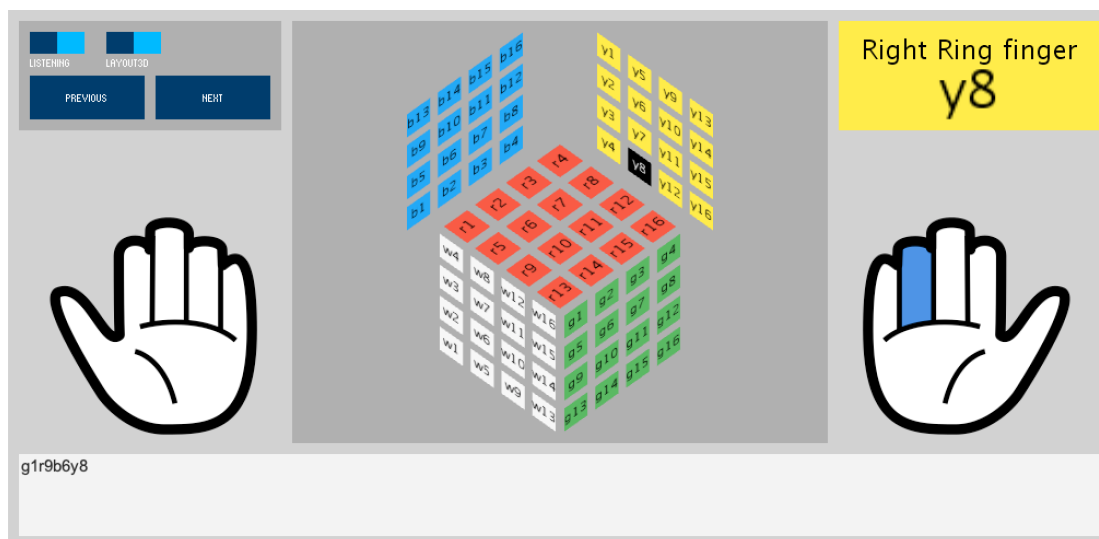


Figure 4.35: Logiciel utilisé lors de l'étude utilisateurs 2 : accessibilité et préférence.

4.4.3 Procédure

L'expérimentation était conduite individuellement avec le même instructeur. Après avoir été introduit à la procédure, le participant était invité à s'asseoir puis devait remplir un questionnaire (Annexe D.5) sur ses compétences (liées à la saisie de texte) et incluant également des questions démographiques. Les mesures de leurs mains (circonférence, longueur et écart) étaient alors prises. Ensuite, l'instructeur demandait au participant de tenir l'appareil dans la position *en diagonale* pour l'ensemble de l'expérimentation. La face bleue et la jaune ont été choisies arbitrairement comme faces externes, tandis que la face blanche et la verte comme faces internes (orientées vers le corps de l'utilisateur), l'instructeur s'est assuré que cette règle fut respectée. La première partie de l'expérimentation concernait l'accessibilité, doigt après doigt, un par un, les participants devaient appuyer sur les touches de l'appareil et signaler à l'instructeur celles considérées, soit facilement accessibles *sans effort* (souvent directement à la portée du bout des doigts) ou accessibles *avec effort* (souvent en déplaçant légèrement la main ou l'appareil),

puis les touches non signalées étaient considérées comme *inaccessibles*. Pour diminuer d'éventuels biais de jugement causés par l'enchaînement des doigts, nous avons contrebalancé l'ordre des mains et des doigts parmi les participants. La seconde partie de l'expérimentation concernait la préférence en termes de doigt pour chaque touche. L'instructeur donnait le code alphanumérique de toutes les touches, un par un, et les participants devaient signaler leur doigt préféré pour appuyer dessus, avec comme instruction d'essayer au minimum deux doigts différents. Pour diminuer d'éventuels biais causés par la succession des touches (celles côte à côte), l'ensemble des 80 touches était aléatoirement mélangé pour chaque participant. Finalement, les participants devaient choisir brièvement les zones (par exemple en spécifiant seulement la couleur des faces) sur lesquelles ils placeraient les lettres et les chiffres, mais aussi plus précisément (par les codes alphanumériques) quelques caractères spéciaux (espace, retour correction, entrée, contrôle, alternative, majuscule) et les repères tactiles (extrusions, habituellement placées sur les lettres F et J des claviers traditionnels). L'expérimentation a duré environ 48 minutes par utilisateur.

4.4.4 Résultats

À partir des données collectées, nous présentons dans cette partie les préférences et les zones d'accessibilité du keycube vis-à-vis des doigts des utilisateurs.

4.4.4.1 Préférence

La Figure 4.36 est une cartographie des préférences pour chacune des touches, les couleurs de fond définissent le doigt préféré (celui le plus choisi) parmi l'ensemble des participants, tandis que les scores de préférence inscrits rapportent la confiance du choix sous la forme de ratio, variant théoriquement entre 1 (le doigt

a été choisi par tous les participants) et 0,14 (le doigt a été choisi par seulement trois participants), les codes alphanumériques des touches sont rapportés dans la couleur de leur face. Plusieurs participants ont signalé avoir des hésitations pour certaines touches (par exemple entre l'index et le majeur avec les deux faces externes, bleu et jaune). À cet égard, trois touches (b1, b4, b11) sont bicolores, car deux doigts ont reçu le même meilleur score de préférence. Les pouces ont les zones de préférences les plus importantes, en se partageant en deux la face rouge (centrale sur la Figure 4.36) puis les faces internes blanches et vertes, tandis que les auriculaires sont préférés pour une seule touche chacun (b1 et y16).

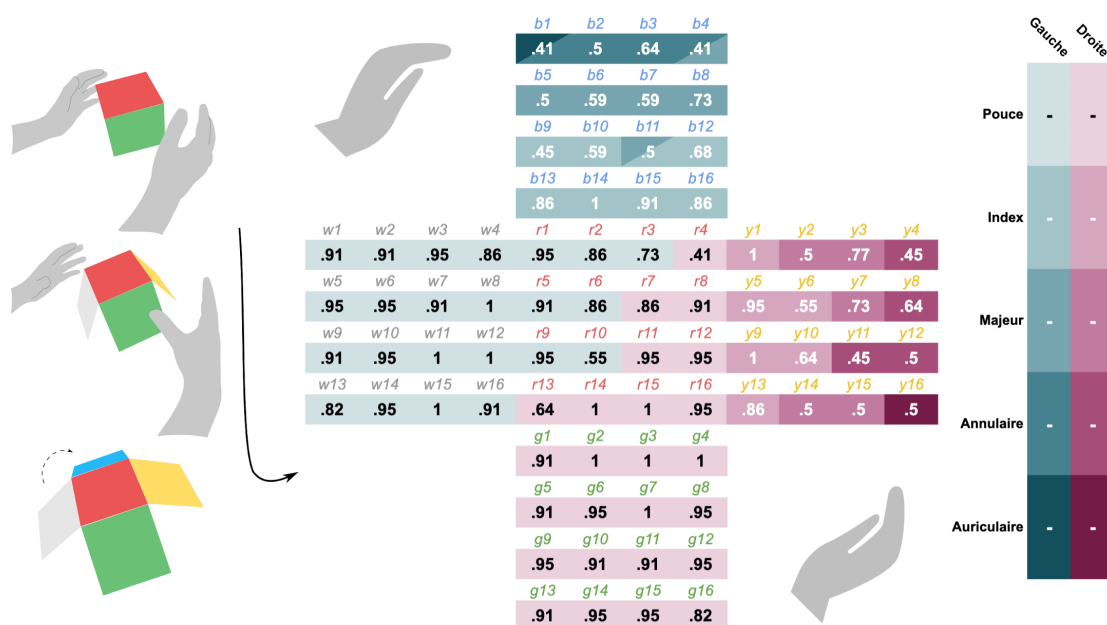


Figure 4.36: Cartographie des zones de préférence (doigt préféré et score par touche).

4.4.4.2 Accessibilité

Les réponses à la question d'accessibilité ont été pondérées de la sorte : 3 points pour facilement accessible, *sans effort*, 1 point pour accessible *avec effort* et 0 point pour *inaccessible*. Le score total d'accessibilité par touche est présenté sur

la Figure 4.37 (à gauche), calculé comme la somme des points de tous les doigts pour l'ensemble des participants. La colorisation par touche varie entre les scores 0 (rouge) et 198 (vert), soit un score équivalent à 3 doigts facilement accessibles. Les scores peuvent théoriquement varier entre 0 (la touche est *inaccessible* pour chacun des doigts avec tous les utilisateurs) et 660 (la touche est considérée facilement accessible, *sans effort* pour chaque doigt avec tous les participants, soit $3 \times 10 \times 22$). Les scores d'accessibilité ont varié entre 22 et 223 (moyenne = 92,8 ; écart-type = 56,6). Naturellement, les zones les plus accessibles sont celles proches du bout des doigts, en particulier des majeurs, car les touches peuvent aussi être aisément appuyées par les index et annulaires.

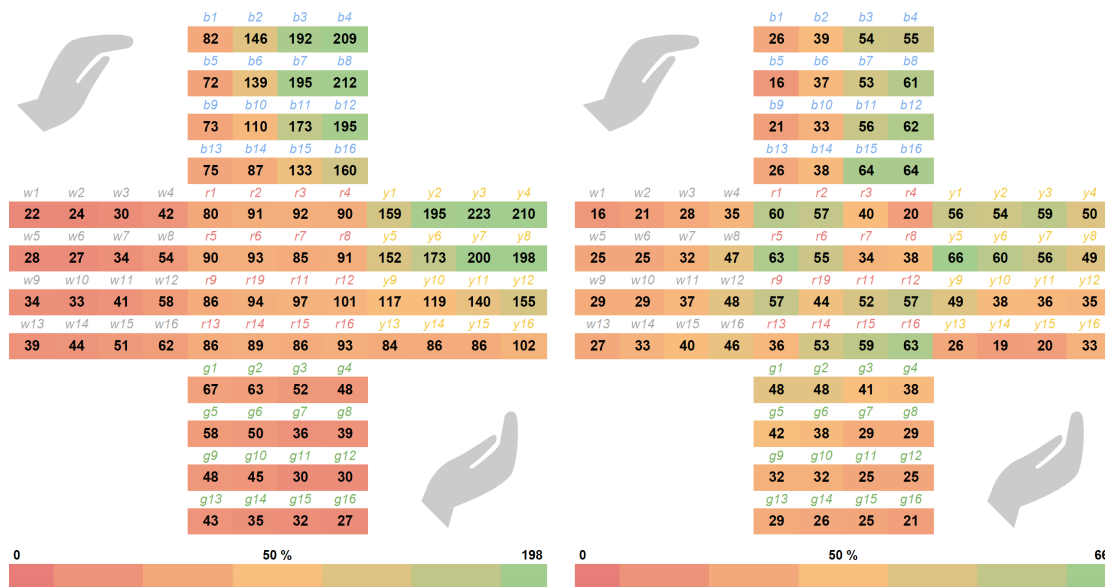


Figure 4.37: Cartes de chaleur des zones d'accessibilité avec le score par touche pour l'ensemble des doigts (à gauche) et avec le score pour le doigt corrélé à la préférence (à droite).

Nous précisons que certaines touches ont reçu un score total d'accessibilité modeste (environ 80), mais présentent un fort score d'accessibilité pour certains doigts uniquement (par exemple avec le pouce pour la face rouge au centre, de r1 à r16), tandis que d'autres touches ont aussi un score total d'accessibilité modeste, sans

pour autant être fortement accessibles avec aucun des doigts (par exemple les zones de touches proches des arêtes du cube en contact avec la paume des mains, b1, b5, b9, b13 et de y13 à y16). À cet égard, la partie droite de la Figure 4.37 est une carte de chaleur présentant les scores d’accessibilités par doigt corrélé avec la préférence, les scores inscrits sont ceux du doigt préféré (rapporté précédemment sur la Figure 4.36) et peuvent varier théoriquement entre 0 (le doigt préféré de la touche est *inaccessible* pour tous les participants) et 66 (le doigt préféré de la touche est facilement accessible, *sans effort* pour tous les participants). Pour les trois touches (b1, b4, b11) avec une préférence partagée par deux doigts, seul le meilleur score d’accessibilité est rapporté. Malgré la proportion de droitiers parmi les participants (90,9 % avec éventuellement une meilleure dextérité pour leur main droite), les moyennes des scores d’accessibilité attribuée à chaque main sont équilibrées, 41,0 (écart-type = 14,7) pour 39 touches avec la gauche et 40,1 (écart-type = 13,6) pour 41 touches avec la droite. Un équilibre qui pourrait s’expliquer par le commentaire libre d’un participant, reconnaissant se sentir plus à l’aise d’effectuer de légers mouvements de l’appareil et de le supporter avec sa main plus forte (dominante), tandis que les doigts de la seconde main (la gauche dans son cas) appuient sur les touches.

Les cartes de chaleur avec des scores d’accessibilité de l’ensemble du keycube pour chacun des doigts sont présentées sur l’Annexe B.3. Les meilleurs scores d’accessibilité (les zones vertes et orange) par doigt reflètent la préférence des utilisateurs à utiliser tel ou tel doigt vis-à-vis d’une touche.

La partie suivante, dédiée à la conception de la disposition cubique des caractères, intègre et prolonge les analyses et discussions de ces résultats, autant sur l’accessibilité que la préférence.

4.5 Conception de la disposition cubique

La disposition cubique des caractères adoptée pour le prototype du keycube est basée sur le QWERTY. Le choix de conception de la disposition est motivé par les résultats des expérimentations 1 et 2 ainsi que de la littérature, en mettant l'accent sur le placement des lettres et des caractères spéciaux : espace, entrée et correction.

Littérature. Par le passé, il y a eu plusieurs tentatives pour améliorer la disposition des caractères du clavier traditionnel QWERTY, telles que les dispositions par ordre alphabétique ou celle du clavier simplifié Dvorak (Norman et Fisher, 1982; Klemmer, 1971). Cependant, de nombreuses études ont montré qu'un changement de disposition, en particulier pour les lettres, n'en valait pas l'effort à cause des gains minimales (Buzing, 2003; Noyes, 1983b). De plus, d'autres études ont montré que rester avec une disposition des caractères QWERTY pour une nouvelle interface d'entrée textuelle permet de bénéficier d'un transfert de connaissance (Matias *et al.*, 1996; Scott *et al.*, 2010; Whitmire *et al.*, 2017). Enfin, d'une manière plus large, des études en économie (Kay, 2013) ont suggéré que la disposition des caractères QWERTY représente un *verrouillage sociotechnique*. Même si des dispositions alternatives sont montrées comme étant supérieures, le changement sera extrêmement difficile, principalement dû aux dépendances sociales et techniques liées entre elles, aux économies d'échelles et à une quasi-irréversibilité d'investissement (David, 1985).

Cohérence. Nos critères de conception du keycube étaient de conserver autant que possible les caractéristiques des claviers traditionnels (tel que la taille et le nombre de touches). Par conséquent, toujours dans l'objectif de capitaliser sur un éventuel transfert des connaissances entre les deux appareils, nous avons adopté la même stratégie concernant la disposition des caractères.

La transformation tridimensionnelle de la disposition QWERTY et la disposition cubique complète sont représentées sur la Figure 4.38. L'objectif était de conserver les relations gauche-droite des touches ainsi que les associations touche-doigt de la saisie de texte avec un clavier traditionnel.

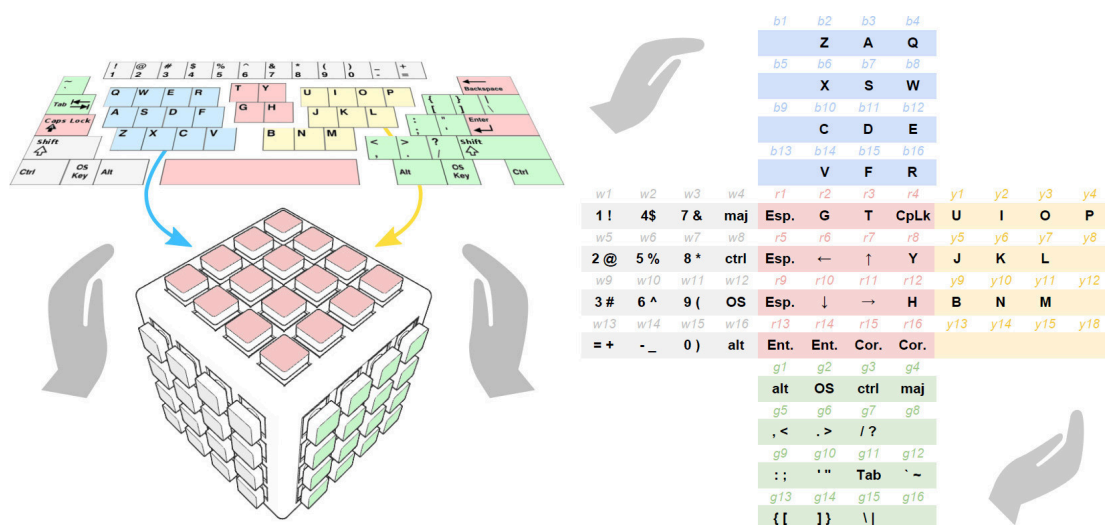


Figure 4.38: Disposition cubique (représentation bidimensionnelle) basée sur le QWERTY (à droite) accompagnée de la représentation symbolique de sa transformation tridimensionnelle (à gauche).

Les touches des faces externes (bleu et jaune) sont accessibles à tous les doigts sauf les pouces et sont dédiées aux caractères les plus utilisés, les lettres. Les chiffres et les caractères spéciaux, moins utilisés, requérant une meilleure visibilité, sont ainsi placés sur les faces internes (blanches et vertes) accessibles par les pouces. L'ensemble des touches de combinaison (touches modifiantes telles que majuscule, contrôle ou alternative) sont doublées symétriquement entre la face blanche et la verte. La face supérieure (rouge) est composée des touches espace, entrée, correction (distribué sur plusieurs touches, respectivement 3, 2 et 2), des 4 flèches directionnelles, du verrouillage majuscule, mais aussi de 4 lettres : T, Y, G et H afin notamment de laisser libre (vide) les lignes strictement inférieures de

la face bleue (b1, b5, b9, b13) et de la jaune (de y13 à y16). Plusieurs critères ont permis de justifier cet écart de conception (vis-à-vis des relations doigts-touche, les pouces n'étant jamais préconisés pour une lettre avec un clavier traditionnel) :

- Les lignes strictement inférieures de la face bleue et de la jaune normalement apte à réceptionner les lettres restantes, sont proche des arêtes de l'appareil en contact avec la paume des mains et sont propices aux appuis accidentels signalés par 35 % des participants de la première étude.
- Les scores d'accessibilité totale des touches b9, b13, y13 et y14 (moyenne 79,5 ; écart-type = 6,5) pouvant accepter respectivement les lettres G, T, Y et H sont légèrement inférieur de 15,2 % à ceux des touches choisies, r3, r3, r8, r12 (moyenne = 93,8 ; écart-type = 4,7). Cette différence est encore plus marquée (du simple au double) pour les scores d'accessibilité par doigt (Annexe B.3 ou Figure 4.37, droite), signifiant que les touches choisies (rouges) sont d'autant plus accessibles pour les pouces que les potentielles touches bleues et jaunes peuvent l'être pour les index.

Par ailleurs, notre choix de s'inspirer du QWERTY est paradoxalement accentué par une critique envers cette disposition, concernant les lignes de distribution des lettres vis-à-vis de leur fréquence d'utilisation dans la langue anglaise (Noyes, 1983b). La ligne supérieure (celle commençant par QWER) est utilisée à 52 % tandis que la ligne principale et centrale (celle commençant par ASDF) représente seulement 32 %, puis 16 % pour la ligne inférieure (celle commençant par ZXCV). Cependant, le changement tridimensionnel de la disposition (passage d'une forme plane à cubique) permet de prendre avantage de cet inconvénient. En effet, il y a un accroissement d'accessibilité (Figure 4.37, gauche) entre les trois lignes réparties sur les faces externes (la bleue et la jaune), en partant de la ligne inférieure (b2, b6, b10, b14, y9 à y12), à la principale (b3, b7, b11, b15, y5 à y8) puis à la supérieure (b4, b8, b12, b16, y1 à y4). Ainsi, avec notre disposition cubique, les lignes les plus utilisées (pour la langue anglaise) sont les lignes plus accessibles.

4.6 Étude utilisateurs 3 : transfert et apprentissage

Après avoir conçu la disposition cubique des caractères sur la base du QWERTY, nous avons conduit une étude utilisateurs pour (1) vérifier si le keycube bénéficie d'un transfert des connaissances du clavier traditionnel en comparant plusieurs dispositions cubiques des caractères, (2) faire ressortir une courbe d'apprentissage de l'utilisation du keycube, (3) mesurer l'utilisabilité et la charge de travail induite par l'appareil.

L'étude utilisateurs avait deux variables indépendantes (facteurs) : la disposition (cubique des caractères) et la session. Le facteur disposition était de type inter-sujets¹ avec 3 conditions (QWERTY, AZERTY et Inconnue), tandis que le facteur session était intra-sujets avec 5 conditions, de la session 1 à 5, ainsi le plan expérimental était mixte². Les variables dépendantes étaient la vitesse de saisie de texte, le taux d'erreur et le nombre de frappes par caractère pour l'ensemble de l'étude, puis les mesures subjectives de l'utilisabilité et de la charge de travail seulement pour le facteur de disposition. De plus, pour étendre nos évaluations comparatives, nous avons inclus des mesures de performance avec une interface référentielle, le clavier traditionnel.

Des parties de cette étude utilisateurs ont fait l'objet d'une publication (Brun *et al.*, 2020).

1. Les participants sont séparés dans des groupes indépendants suivant les conditions d'une variable indépendante.

2. Mélange de variables inter-sujets et intra-sujets.

4.6.1 Participants

Vingt-quatre (24) participants (4 gauchers, 20 droitiers ; 15 femmes, 8 hommes ; entre 19 et 36 ans, 28 en moyenne) ont été recrutés dans les bureaux de l'Université TÉLUQ à Montréal par bouche-à-oreille et à l'aide d'affiches. Sept participants avaient participé au moins à l'une des études précédentes avec un délai minimum de 4 semaines. Les participants sélectionnés devaient écrire avec un clavier traditionnel tous les jours, la moitié d'entre eux avec une disposition QWERTY et l'autre moitié avec un AZERTY (similaire au QWERTY, utilisé principalement en France), tous les participants devaient ignorer la disposition des caractères alternative Dvorak. Pour être certain que les participants connaissaient leur disposition respective (QWERTY ou AZERTY), ils devaient être capables de saisir du texte avec une vitesse minimum de 30 mots par minute. Trois d'entre eux ont signalé ne jamais regarder le clavier en écrivant. Nous demandions aux participants de savoir lire, écrire et comprendre l'anglais. Tous les participants ont donné leur accord et ont reçu 35 \$ CA (environ 23 EUR) comme compensation financière pour leur participation.

4.6.2 Matériel

Trois nouveaux prototypes de keycube ont été construits. Pour répondre à plusieurs remarques des deux premières études utilisateurs, un cordon (une dragonne) pour cou (ou poignet) a été ajouté à la structure pour des raisons de sécurité et l'écran a été remplacé par une surface plane imprimée en 3D, diminuant le poids total à 383 grammes. Par ailleurs, le cordon, placé au niveau d'un sommet supérieur, au croisement de la face rouge, blanche et verte, permet de rajouter un point de repère tactile, pour orienter l'appareil sans avoir à le regarder. Chaque keycube était connecté en Bluetooth à un ordinateur portable 15 pouces. Les cla-

viers traditionnels QWERTY et AZERTY utilisés pour la comparaison étaient des claviers Apple.

Contrairement aux précédentes études utilisateurs, les keycubes incluait l'inscription des caractères sur chacune des touches. Un keycube était dédié à la disposition QWERTY présentée précédemment sur la Figure 4.38. Les touches vides sans caractère (par exemple de y13 à y16) étaient couvertes d'une protection neutre entièrement transparente pour éviter de créer un déséquilibre physique et une différence tactile.

4.6.2.1 Disposition cubique des caractères basée sur l'AZERTY et Inconnue

Les deux autres keycubes étaient composés de dispositions différentes. La disposition cubique basée sur l'AZERTY est aussi censée bénéficier d'un transfert des connaissances pour les participants habitués à cette disposition. La disposition cubique basé sur l'AZERTY est similaire à celle basée sur le QWERTY, seules les touches des caractères Q et A, W et Z puis M et le code y8 ont été inversées (Figure 4.39, gauche).

La troisième disposition cubique par contre devait être inconnue par les participants et fut créée pour éviter de bénéficier d'un transfert de connaissances. Pour des raisons d'équité, au lieu d'assigner aléatoirement les caractères, nous avons conçu une disposition cubique (Figure 4.39, droite) basée sur la disposition DSK (Dvorak Simplified Keyboard) optimisée pour la langue anglaise (Buzing, 2003). Nous avons appliqué la même stratégie que celle adoptée pour transformer le QWERTY, néanmoins, la ligne supérieure et la principale ont été inversées dans la version cubique par rapport à la disposition originale, car cette dernière était optimisée pour utiliser le plus possible la ligne principale (moins accessible que la ligne supérieure avec le keycube).

Les différences entre les trois dispositions cubiques présentées concernent uniquement les placements des lettres, car aucun chiffre ou caractère spécial (excepté Espace, Entrée et Correction) ne fut utilisé dans cette étude utilisateurs. De plus, malgré les changements d’emplacements des lettres, ces dernières restent strictement affectées au même ensemble de touches, excepté pour la lettre M de la disposition cubique basée sur l’AZERTY, placé sur la touche y8, habituellement vide.

	b1	b2	b3	b4		b1	b2	b3	b4	
		W	Q	A			P	J	O	
	b5	b6	b7	b8		b5	b6	b7	b8	
	X	S	Z			Y	Q	A		
	b9	b10	b11	b12		b9	b10	b11	b12	
	C	D	E			F	K	U		
	b13	b14	b15	b16		b13	b14	b15	b16	
	V	F	R			G	X	E		
w4	r1	r2	r3	r4	y1	y2	y3	y4		
shift	Sp	G	T	CpLk	U	I	O	P		
w8	r5	r6	r7	r8	y5	y6	y7	y8		
ctrl	Sp	Left	Up	Y	J	K	L	M		
w12	r9	r10	r11	r12	y9	y10	y11	y12		
OS	Sp	Dwn	Rght	H	B	N				
w16	r13	r14	r15	r16	y13	y14	y15	y18		
alt	Entr	Entr	BkS	BkS						
	g1	g2	g3	g4						
	alt	OS	ctrl	shift						

	b1	b2	b3	b4		b1	b2	b3	b4	
		P	J	O			P	J	O	
	b5	b6	b7	b8		b5	b6	b7	b8	
	Y	Q	A			Y	Q	A		
	b9	b10	b11	b12		b9	b10	b11	b12	
	F	K	U			F	K	U		
	b13	b14	b15	b16		b13	b14	b15	b16	
	G	X	E			G	X	E		
w4	r1	r2	r3	r4	y1	y2	y3	y4		
shift	Sp	B	I	CpLk	H	T	N	S		
w8	r5	r6	r7	r8	y5	y6	y7	y8		
ctrl	Sp	Left	Up	D	W	V	Z			
w12	r9	r10	r11	r12	y9	y10	y11	y12		
OS	Sp	Dwn	Rght	M	C	R	L			
w16	r13	r14	r15	r16	y13	y14	y15	y18		
alt	Entr	Entr	BkS	BkS						
	g1	g2	g3	g4						
	alt	OS	ctrl	shift						

Figure 4.39: Disposition cubique des caractères basée sur l’AZERTY à gauche et Inconnue (basée sur la disposition DSK) à droite.

4.6.3 Logiciel

Une application exécutée sur l’ordinateur portable a été conçue avec Processing (Figure 4.40) et présentait des phrases en anglais provenant d’un corpus de 500 phrases (1163 mots uniques, 2712 au total) régulièrement utilisé pour mesurer des interfaces de saisie de texte (MacKenzie et Soukoreff, 2003). Les phrases sont facilement mémorables, elles comprennent entre 16 et 43 caractères (moyenne = 28,6), uniquement des lettres de l’alphabet (aucune ponctuation ou chiffre) et sont re-

présentatives de la langue anglaise en termes de fréquence des caractères. Pour être cohérent (en termes de comparaison) avec de nombreuses autres études, et en accord avec les recommandations des auteurs du corpus, les quelques cas des caractères en majuscule ont été transformés en minuscule pour se concentrer essentiellement sur les lettres de l'alphabet. Le logiciel présentait aussi la vitesse de saisie de texte et le taux d'erreur de la dernière phrase retranscrite, de même que le temps restant pour la session.



Figure 4.40: Capture d'écran de la partie visible du logiciel dédié à l'étude utilisateurs.

4.6.4 Procédure

L'expérimentation a été approuvée par le comité d'éthique à la recherche avec des humains de l'Université TÉLUQ. Après avoir présenté individuellement la procédure de l'expérimentation, nous demandions aux participants de prendre place près de l'ordinateur portable (Figure 4.41) puis de signer le formulaire de consentement. Nous leur avons demandé de remplir un questionnaire (Annexe D.6), sur leur compétence de saisie d'écriture, et avons procédé aux mesures de leurs mains. Les participants devaient lire et retranscrire quelques phrases sélectionnées aléatoirement pour brièvement vérifier leur vitesse d'écriture actuelle et compréhension

de l'anglais. L'instructeur assignait ensuite au participant un des keycubes suivant la disposition de clavier traditionnel habituellement utilisé par le participant. Les différences de placement des lettres entre le QWERTY et l'AZERTY sont minimales et nous n'attendions pas de différence de compétence avec les claviers traditionnels. De fait, pour le groupe avec la disposition cubique Inconnue, la moitié d'entre eux utilisaient habituellement une disposition QWERTY et l'autre moitié une disposition AZERTY, cela représente 3 groupes (pour chaque disposition cubique) de 8 participants. L'instructeur montrait comment saisir l'appareil (position *en diagonale*), mais les participants étaient autorisés à le porter comme ils le souhaitent. L'instructeur montrait seulement l'emplacement des touches nécessaires à l'expérimentation (les lettres, espace, correction et entrée) sans donner d'explication sur la disposition. Les participants devaient éviter le plus possible d'appuyer sur les touches non utilisées (par exemple celles de la face blanche et de la verte) et l'instructeur demandait spécifiquement « d'entrer le texte le plus vite et plus juste possible ». Les participants démarraient ensuite un échauffement en écrivant deux fois l'alphabet, puis l'expérimentation était composée d'une succession de sessions de 20 minutes chacune.

Des pauses courtes (PC) et longues (PL) s'intercalaient entre les sessions de la façon suivante : S1 (session 1), PC, S2, PL, S3, PC, S4, PL, S5, PC, S6. Les pauses courtes duraient environ 1 minute et les pauses longues environ 30 minutes (au minimum 20 minutes et au maximum 80 minutes). Nous avons intégré des pauses longues, car saisir du texte le *plus vite possible* pendant 20 minutes est une activité très demandante. Nous demandions aux participants de ne pas saisir de texte avec un clavier traditionnel pendant les pauses, mais nous autorisons la saisie de texte sur un clavier virtuel (par exemple, celui du téléphone intelligent). Les 5 premières sessions (S1 à S5) étaient effectuées avec le keycube. La dernière session (S6) était effectuée avec le clavier traditionnel et les participants devaient écrire deux fois



Figure 4.41: Participante utilisant le keycube dans la configuration de l'étude utilisateurs 3.

l'alphabet puis quelques phrases comme échauffement, pour diminuer le potentiel biais d'utilisation du keycube. Pour chaque participant, l'expérimentation au complet était conduite sur une seule demi-journée et nous avons estimé qu'une seule session (de 20 minutes) était suffisante pour mesurer les performances avec le clavier traditionnel. Chaque session était conduite similairement et consistait à un écrire un ensemble de phrases en anglais choisi aléatoirement dans l'ensemble de phrases proposé par MacKenzie et Soukoreff (2003). Directement après la session 5 (effectué avec le keycube) et après la session 6 (effectué avec le clavier traditionnel), les participants devaient répondre aux questionnaires du NASA-TLX pour mesurer la charge de travail (Hart et Staveland, 1988) et du SUS pour mesurer l'utilisabilité (Brooke, 1996), en considérant leur réponse seulement pour la session précédente. Au total (en incluant les pauses), l'expérimentation a duré environ 3h et 50 minutes par participant (écart-type = 40 minutes).

Cette procédure est inspirée de précédentes études utilisateurs liées à deux autres appareils de saisie de texte, un mini clavier QWERTY (Clarkson *et al.*, 2005) et un clavier accord, le Twiddler (Lyons *et al.*, 2004). En particulier, nous partageons avec ces études, l'ensemble de phrases à saisir et la durée de 20 minutes par session, essentiellement pour être représentatif d'une saisie de texte intensive semblable à un contexte de bureau. Nous avons fait le choix de condenser les sessions dans une même demi-journée pour être proche des conditions rencontrées dans des environnements de travail de bureau, requérant parfois des journées entières à saisir du texte.

4.6.5 Résultats

Au total, durant les sessions, pour tous les participants, nous avons enregistré 153 450 appuis de touche et 4 822 phrases retranscrites avec les keycubes, soit environ 6 394 appuis et 201 phrases retranscrites par participant. Nous avons enlevé les phrases avec un taux d'erreur supérieur à 20 %, (représentant 2,05 % de l'ensemble) pour exclure les valeurs aberrantes causées en validant la phrase trop tôt (par erreur).

Pour rappel, les formules de vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère ainsi que les méthodes NASA-TLX (pour mesurer la charge de travail) et SUS (pour mesurer l'utilisabilité) sont présentés au début de l'état de l'art, partie 2.1.

4.6.5.1 Vitesse de saisie de texte

La vitesse de saisie de texte est reportée sur la Figure 4.42 en mots par minute (sur la gauche) et relative (en pourcentage) à la vitesse de saisie de texte avec le clavier traditionnel (sur la droite). Une analyse de variance à deux facteurs

a montré un effet significatif autant pour la disposition cubique des caractères ($F_{2,105} = 83,761; p < 0,05$) que pour les sessions ($F_{4,105} = 11,288; p < 0,05$). Les vitesses de saisie de texte moyenne pour la première session avec les dispositions cubiques QWERTY, AZERTY et Inconnue étaient respectivement 12,1 (écart-type = 3,0), 10,7 (écart-type = 1,7) et 6,6 (écart-type = 0,9) mots par minute, pour finir à la dernière session (du keycube, S5) avec 18,7 (écart-type = 4,8) 16,6 (écart-type = 3,0) et 9,0 (écart-type = 1,6) soit une augmentation de 54,8 %; 55,2 % et 35,2 %. Pour la dernière session, les moyennes de la vitesse de saisie de texte des dispositions basées sur le QWERTY et l’AZERTY sont près du double (respectivement 107 % et 84 %) de la moyenne de la disposition Inconnue. Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a été effectuée pour déterminer qu’il n’y avait pas de différence significative entre les dispositions cubiques QWERTY et AZERTY sur la vitesse de saisie de texte, autant pour la première ($p = 0,255$) que la dernière session ($p = 0,298$).

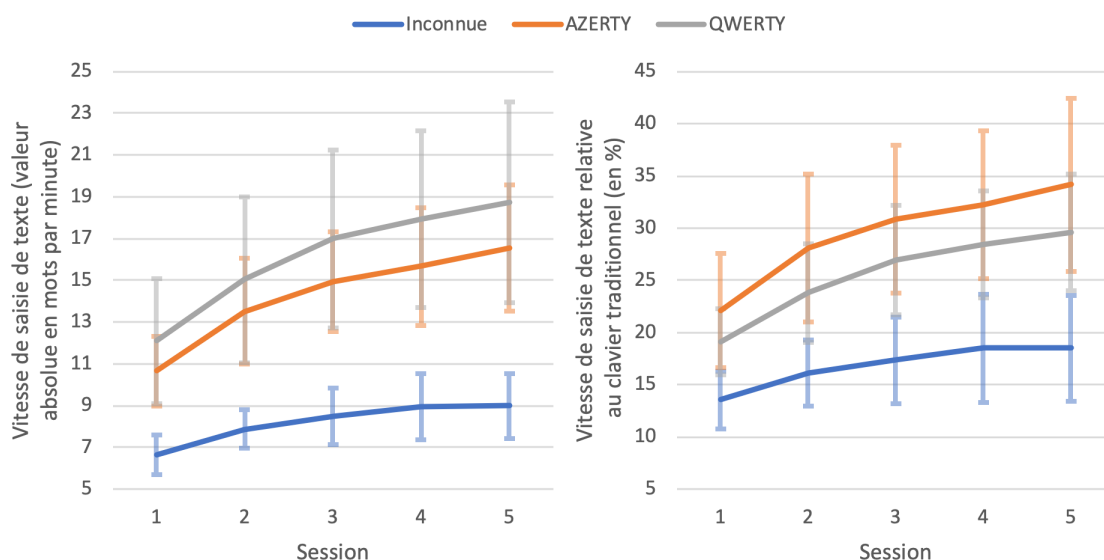


Figure 4.42: Vitesse de saisie de texte absolue à gauche et relative au clavier traditionnel à droite, par session et pour chaque disposition cubique.

De nombreux utilisateurs ($n = 14$) ont signalé à voix haute un problème concer-

nant la répétition de caractères (saisie plusieurs fois) alors qu'ils appuyaient seulement une fois sur la touche. Nous avons analysé les enregistrements et détecté ce problème avec le temps entre plusieurs appuis en considérant comme valeur aberrante les écarts entre deux saisies d'un caractère similaire inférieur à 50 millisecondes, représentant 0,75 % de toutes les saisies de la session 5. Pour éviter les répétitions de caractères, une mise à jour logicielle fut implémentée (puis présentée) lors de la dernière étude utilisateurs (partie 4.8.4).

Par ailleurs, nous avons enregistré tous les appuis accidentels des touches non utilisées du keycube (par exemple celles de la face blanche et de la verte). Les participants ont signalé appuyer sur quelques touches non intentionnellement et principalement avec leur paume de mains. Pour la session 5, cela représente 2,53 % du total des appuis, cela a pu avoir des conséquences sur la vitesse en forçant les participants d'être attentionnés et d'utiliser l'appareil plus délicatement.

La Figure 4.43 présente les moyennes du délai (temps) entre deux appuis pour chaque touche pendant la dernière session du keycube (S5), avec les dispositions cubiques basées sur le QWERTY et l'AZERTY. Ce délai représente le temps nécessaire pour chercher, trouver et appuyer sur une touche. Les problèmes de doublement des caractères, les appuis accidentels de touche non utilisés et les premières lettres des phrases ont été exclus des calculs de délais. L'espace est le plus rapide (0,463 s), pour plusieurs raisons, il est régulièrement utilisé (représentant 14,3 % des appuis) et disposé sur trois touches d'une zone facilement accessible pour le pouce. Les lettres les plus utilisées telles que E (10,0 %) ; O (6,1 %) et A (6,0 %) ont reçu des délais très faibles, respectivement 0,464 s ; 0,549 s et 0,503 s. À l'opposé, les délais élevés des lettres J et Q (respectivement 1,225 s et 1,196 s) peuvent s'expliquer par leur fréquence, ces deux lettres sont parmi les trois caractères (avec la lettre Z) les moins utilisés, représentant chacun 0,2 % de l'ensemble des appuis. La lettre B est le caractère le plus lent (1,559 s), un résultat

pouvant être expliqué, car sa touche correspondante est affectée à la main droite avec le keycube, tandis qu'elle est habituellement saisie avec la main gauche sur les claviers traditionnels QWERTY. Les 4 lettres (T, Y, G et H, disposées sur la face rouge) ayant subi un changement (du doigt, affectées aux pouces avec le keycube, mais habituellement saisis avec les index) ont un délai moyen (0,853 s ; écart-type = 0,187) plus long (de 7,1 %) que la moyenne de l'ensemble (0,796 s ; écart-type = 0,272), malgré la fréquence élevée de la lettre T (représentant 7,2 % des appuis). Cependant, la correction (représentant 3,7 % des appuis) est aussi présente sur la face rouge, mais avec un délai 10 % inférieur à la moyenne de l'ensemble des caractères, une réduction du temps expliquée par le doublement des touches dans une zone plus accessible aux pouces.

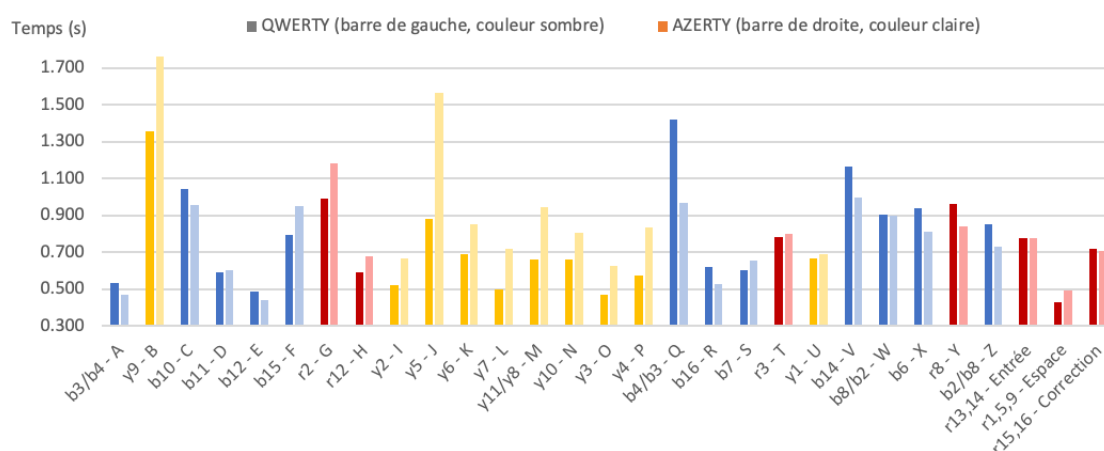


Figure 4.43: Temps de frappe d'un caractère pour les dispositions cubiques QWERTY et AZERTY durant la dernière session du keycube (S5).

4.6.5.2 Taux d'erreur et nombre de frappes par caractère

Pour des phrases composées seulement des lettres de l'alphabet, le keycube, comme le clavier traditionnel, est non ambigu, chaque lettre a une touche dédiée. Ainsi la meilleure (et la plus basse) valeur du nombre de frappes par caractère est de 1,0.

Le taux d'erreur et le nombre de frappes par caractères pour chaque disposition cubique et pour toutes les sessions sont présentés sur la Figure 4.44.

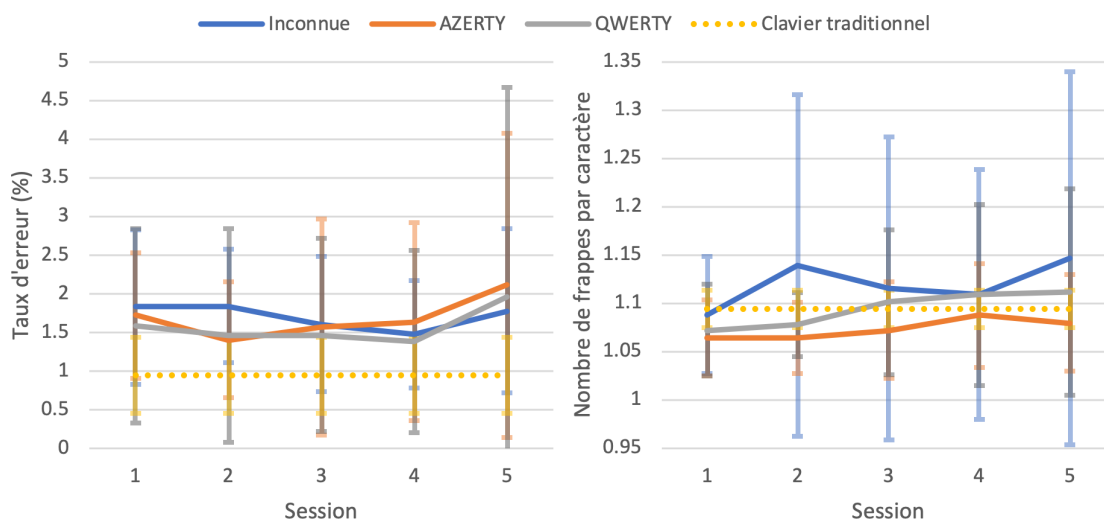


Figure 4.44: Taux d'erreur (gauche) et nombre de frappes par caractère (droite) par session pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel.

Des analyses de variance à deux facteurs ont montré que ni la disposition ni les sessions n'ont eu d'effets significatifs sur le taux d'erreur (avec respectivement $p = 0,883$ et $0,768$) et sur le nombre de frappes par caractère (avec respectivement $p = 0,128$ et $0,772$). Le taux d'erreur moyen pour toutes les sessions et dispositions est 1,66 % (écart-type = 1,26), tandis que le nombre de frappes par caractère est 1,09 (écart-type = 0,10). Tous les participants semblent avoir adopté le même comportement tout au long de l'expérimentation : corriger la plupart des erreurs et éviter autant que possible d'appuyer sur les mauvaises touches.

4.6.5.3 Charge de travail

La charge de travail a été mesurée avec la méthode NASA-TLX (Annexe C.2). Le score final (brut) et toutes les mesures par dimension pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel sont présentés sur la Figure 4.45.

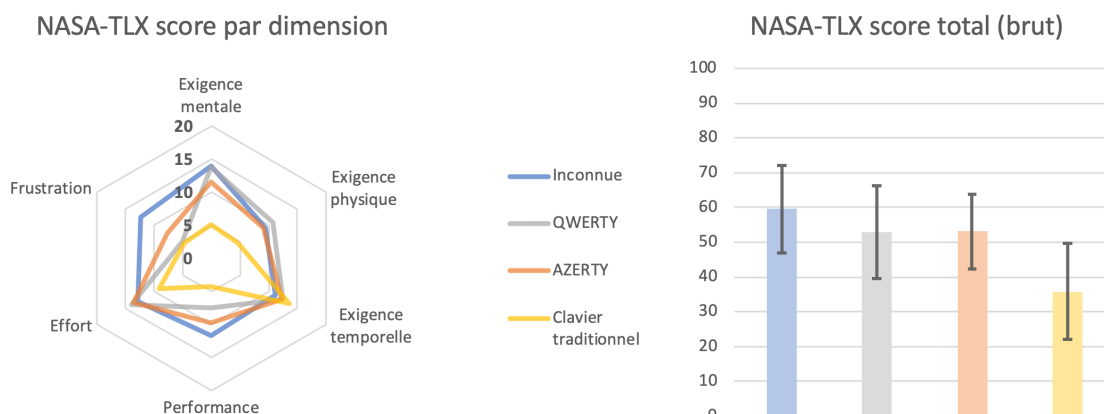


Figure 4.45: Score du NASA-TLX par dimension, à gauche, et total (brut) à droite pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel.

Des scores faibles sont préférables car ils indiquent un niveau faible de charge de travail. Le score de la charge de travail de la disposition Inconnue (moyenne = 59,6 ; écart-type = 12,6) est légèrement plus élevé que les scores des dispositions basées sur le QWERTY (moyenne = 52,9 ; écart-type = 13,24) et l'AZERTY (moyenne = 53,1 ; écart-type = 10,7). Cette différence est particulièrement prononcée (et causée) par la dimension *Frustration* où la disposition cubique basée sur l'Inconnue est considérée plus frustrante. Le score de la charge de travail du clavier traditionnel (moyenne = 35,8 ; écart-type = 13,8) était moins élevé que celles du keycube, un résultat attendu, car l'appareil était familier pour les participants.

4.6.5.4 Utilisabilité

L'utilisabilité a été mesurée avec la méthode SUS (Annexe C.1). Les scores d'utilisabilité pour chaque disposition cubique et pour le clavier traditionnel sont reportés sur la Figure 4.46. Un haut score sur l'échelle est préférable, car indique une meilleure utilisabilité.

Les dispositions cubiques basées sur le QWERTY, l'AZERTY et Inconnue ont

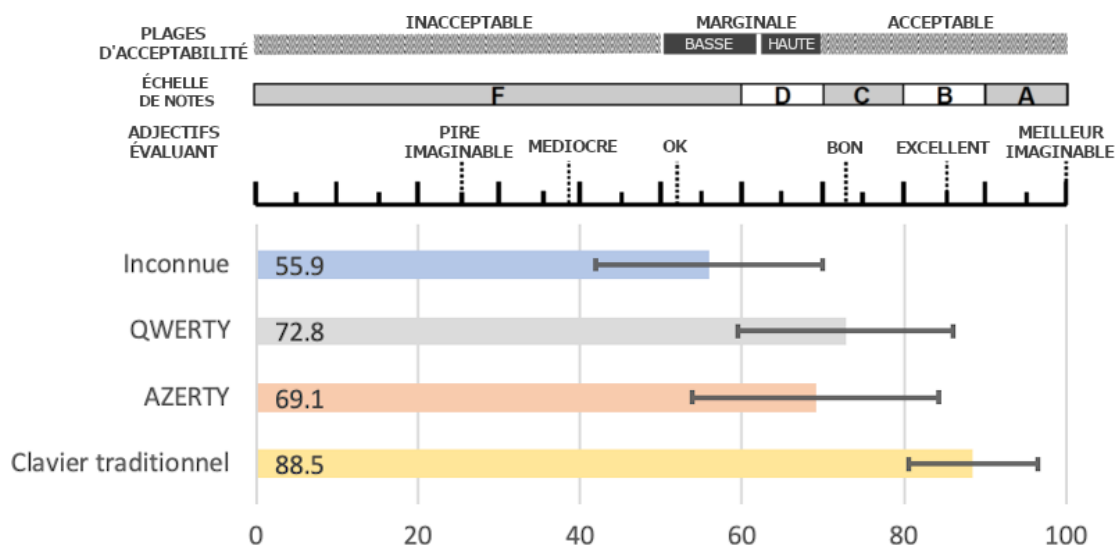


Figure 4.46: Score du SUS pour chaque disposition cubique et clavier traditionnel avec les marges d'acceptabilité et les adjectifs qualificatifs, notre traduction (Bangor *et al.*, 2009).

respectivement reçu un score de 72,8 (écart-type = 13,3), 69,1 (écart-type = 15,2) et 55,9 (écart-type = 14,1). Les scores des deux dispositions cubiques basées sur le QWERTY et l'AZERTY sont respectivement entrés dans la gamme « acceptable » et « marginale haute », proche du niveau « bon » et sont respectivement 30 % et 24 % plus importants que le score de disposition cubique Inconnue. Le score d'utilisabilité du clavier traditionnel est 88,5 (écart-type = 7,6) et atteint le niveau qualifié d'excellent. Ces résultats sont cohérents avec des études précédentes montrant que les appareils génériques (le clavier traditionnel), en bénéficiant d'une importante familiarité, devraient avoir un score environ 15-16 % plus élevé qu'un nouveau prototype (le keycube) (Kortum et Bangor, 2013).

4.6.6 Discussion

De manière générale, l'ensemble des résultats sont cohérents, les deux dispositions cubiques QWERTY et AZERTY sont similaires avec des résultats plus po-

sitifs que la disposition cubique Inconnue, signifiant qu'il y a bien eu un transfert des connaissances, particulièrement marqué pour la vitesse de saisie de texte (du simple au double) et l'utilisabilité (d'un rapport de 30 %). Un transfert de connaissance appuyé par les commentaires ouvert de 37,5 % des participants (6 sur 16, car attendu uniquement pour les groupes avec les dispositions QWERTY ou AZERTY) ayant mentionné «c'est plus simple que ce que je pensais», des commentaires d'autant plus encourageants qu'ils étaient spontanés, sans réflexion et hors questionnaire.

Les utilisateurs du keycube ont atteint 19 mots par minute en 100 minutes de pratique sur une seule demi-journée avec la disposition cubique QWERTY, représentant 30 % de leur performance avec un clavier traditionnel. Ces résultats sont encourageants lorsqu'ils sont mis en perspective par d'autres travaux. Les utilisateurs du clavier accord Twiddler ont atteint 13 mots par minute après la 5^e session (de 20 minutes aussi). Les utilisateurs n'atteignent le score de 19 qu'à la 10^e session, pour un taux d'erreur comparable à celui du keycube (Lyons *et al.*, 2004). Néanmoins leur interface utilise qu'une seule main. Avec le *RearType* (clavier derrière une tablette capitalisant aussi sur le transfert de connaissance du QWERTY), des experts en saisie de texte avec clavier traditionnel ont atteint 15 mots par minute après avoir pratiqué une saisie de texte pendant 60 minutes (Scott *et al.*, 2010). Les résultats du keycube sont aussi comparables à ceux de l'interface *Half-QWERTY* (un clavier traditionnel diminué de moitié), pour un temps de pratique équivalent, les participants ont atteint 18,3 mots par minute (Matias *et al.*, 1993).

La vitesse n'est pas la seule caractéristique importante d'une interface de saisie de texte, ainsi, plusieurs participants ($n = 5$) ont signalé que la mobilité de l'appareil leur permettait d'adopter des positions plus relaxantes qu'avec un clavier traditionnel, par exemple, le dos contre la chaise avec les bras le long du corps se

reposant sur les cuisses. Les participants étaient assis face à un ordinateur portable, néanmoins, la plupart d’entre eux (75 %, $n = 18$) ont manipulé le keycube sans utiliser la table durant toute l’expérimentation, le plus souvent en tenant l’appareil avec les avant-bras fléchis (Figure 4.41) comme ce fut le cas lors de la première étude utilisateurs, gardant ainsi l’avantage mobilité de l’appareil. Les autres participants ont parfois utilisé la table comme support pour leurs coudes, leurs avant-bras ou même directement l’appareil.

Aucune stratégie n’a été mise en place pour limiter le regard des utilisateurs vers l’appareil, cependant, 6 participants ont ouvertement rapporté avoir commencé entre la 1^{er} et la 3^e session à saisir des caractères sans avoir à concentrer leur regard sur la touche correspondante. À cet égard, un participant du groupe avec la disposition cubique QWERTY a décidé de saisir la totalité des phrases sans regarder le keycube pour l’ensemble de l’expérimentation à partir de la première moitié de la session 1, sa vitesse de saisie de texte fut moins élevée avec 10,1 mots par minute lors de la dernière session, mais au contraire son score d’utilisabilité fut plus élevé en atteignant 92,5.

Par ailleurs, nous pensons que deux situations contraignantes ont affecté négativement les performances des utilisateurs :

- **Répétition des caractères.** Les boutons physiques intégrés aux keycubes sont sujets à des rebonds, des changements d’état (ouvert/fermé) très rapides (quelques millisecondes) causés lorsque les surfaces métalliques flexibles des boutons se connectent ou déconnectent. Notre implémentation tant logicielle que matérielle du keycube n’intégrait pas de systèmes anti-rebond, créant des répétitions de caractères indésirées et forçant les participants soit à les corriger, réduisant leur vitesse de saisie de texte et augmentant le nombre de frappes par caractère, soit à les ignorer et augmentant ainsi le taux d’erreur.

- **Fatigue.** La diminution de la vitesse de saisie de texte pour la dernière session (S5) avec la disposition cubique Inconnue et les commentaires de 8 participants laissent suggérer que l'expérimentation était très éprouvante, y compris pour les groupes avec les dispositions cubiques basées sur le QWERTY et AZERTY. Malgré les pauses, l'instruction de saisir du texte le plus rapidement et avec le moins d'erreurs possible intensivement pendant 1h40 (en l'espace de 3h20), reste une tâche fatigante.

De plus, l'appareil a pu causer une fatigue musculaire, mentionnée par 9 participants, pour différents emplacements du corps : les petits doigts ($n = 2$), les mains ($n = 2$), les poignets ($n = 2$), dos et poitrine ($n = 3$). Le plus souvent, les causes données furent le poids ou la taille jugés trop élevés. Un participant ayant fait remarquer : « Physiquement c'est très différent, mais étonnamment je me sens plutôt confortable » a aussi mentionné que la force d'activation des boutons pourrait être réduite. À cet égard, nous pouvons adopter une stratégie consistant à implémenter des boutons avec des forces d'activations variables suivant leur emplacement, ou leur fréquence d'utilisation, en augmentant uniquement la force d'activation des boutons proche des zones sujettes aux appuis accidentels (par exemple, proche des arêtes en contact avec les paumes de main) et en réduisant celle des boutons volontairement régulièrement appuyés.

4.7 Étude utilisateurs 4 : réalité augmentée et usage des doigts

Après avoir mesuré le potentiel de la disposition cubique basé sur le QWERTY et AZERTY dans un contexte immobile (assis devant un bureau, avec un ordinateur portable), nous avons conduit une étude utilisateurs dans le but de mesurer et comparer le potentiel du keycube pour une utilisation avec un visiocasque de réalité augmentée, dans une posture de mobilité (debout). De plus, l'usage des

doigts a été mesuré pour vérifier si l'interface keycube pouvait offrir le même avantage que le clavier traditionnel, tel que la réduction des efforts physiques en partageant la charge d'utilisation sur plusieurs doigts.

L'étude était de type intra-sujets avec une seule variable indépendante : l'interface de saisie de texte, en étant soit un keycube, soit un clavier virtuel sur téléphone intelligent ou alors un clavier virtuel du visiocasque de réalité augmentée. Les variables dépendantes étaient la vitesse de saisie de texte, le taux d'erreur, le nombre de frappes par caractère puis l'utilisabilité et la charge de travail subjective. Toujours pour des raisons de comparaisons, nous avons relevé les performances des utilisateurs avec le clavier traditionnel.

4.7.1 Participants

Neuf (9) volontaires recrutés sur le campus universitaire de l'IUT Laval (Université Le Mans) ont participé à cette expérimentation (5 femmes, 4 hommes ; entre 24 et 35 ans, 28 en moyenne). Aucun des participants n'avait pris part à l'étude précédente. Les participants devaient savoir lire, écrire et comprendre l'anglais. Tous les participants utilisaient le clavier traditionnel plusieurs fois par jour (vitesse de saisie de texte minimum requise, 30 mots par minute), deux tiers d'entre eux regardaient toutes les touches du clavier pour saisir du texte et le reste des participants regardaient seulement les caractères spéciaux. Tous les participants utilisaient un téléphone intelligent plusieurs fois par jour, 62,5 % (5/9) d'entre eux saisissaient du texte avec la fonctionnalité d'autocorrection et 87,5 % (7/9) avec les suggestions de mots, aucun n'utilisait la saisie de mots par gestuelle. Tous les participants ont donné leur consentement et ont reçu 10 EUR (environ 15 \$ CA) comme compensation financière pour leur participation.

4.7.2 Matériels

Le matériel principal utilisé par les participants (Figure 4.47) incluait un prototype de keycube, un visiocasque de réalité augmentée (HoloLens de Microsoft, 1^{er} génération) et un téléphone intelligent (Pixel de Google). En adéquation avec les compétences des participants (tous français), le keycube était configuré avec la disposition cubique des caractères AZERTY. En outre, un ordinateur portable (avec la disposition des caractères AZERTY) fut utilisé pour mesurer la vitesse de saisie de texte avec un clavier traditionnel puis deux tablettes ont été utilisées pour filmer les participants et remplir des questionnaires.

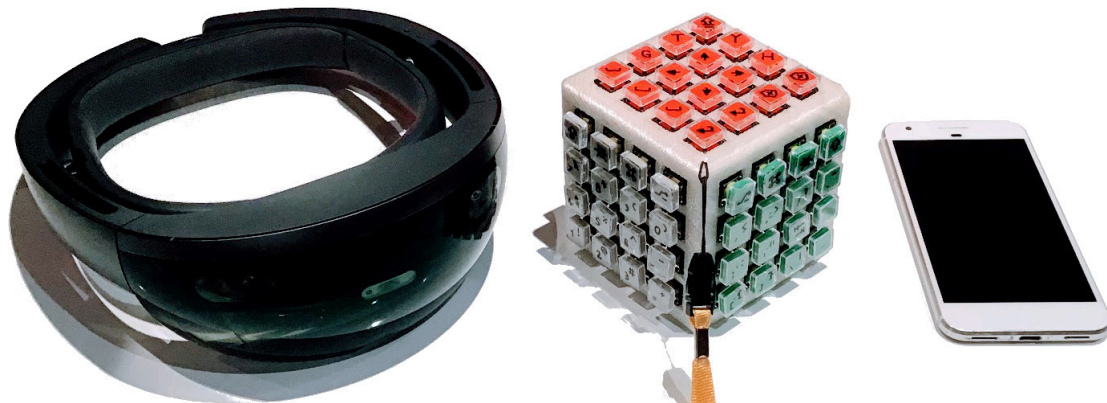


Figure 4.47: Matériel utilisé pour l'étude utilisateurs 4, visiocasque de réalité augmentée (HoloLens de Microsoft), keycube et téléphone intelligent (Pixel de Google).

4.7.3 Logiciel

Une application a été conçue avec Unity (plateforme de développement 3D en temps réel), compatible autant pour le visiocasque de réalité augmentée que l'ordinateur portable. L'application affichait des phrases et offrait un champ de texte pour les retranscrire, puis enregistrait l'ensemble des événements (par exemple une interaction, la saisie d'un caractère) dans des traces. Les phrases présentées

étaient en anglais et proviennent du même ensemble utilisé lors de la précédente étude utilisateurs, elles sont facilement mémorables et uniquement composées de lettres (MacKenzie et Soukoreff, 2003).

L'application permettait de saisir du texte de 4 façons différentes, soit avec un clavier traditionnel (uniquement sur l'ordinateur portable) soit avec l'une des trois interfaces de saisie de texte pour le visiocasque de réalité augmentée (Figure 4.48) :

- *Visiocasque*, nommé ainsi, car l'interface utilise uniquement le visiocasque de réalité augmentée. Cette interface de saisie de texte est similaire à celle incluse par défaut avec le visiocasque de réalité augmentée et à celle précédemment utilisée pour comparer l'interface ControlWear, excepté que les touches virtuelles dédiées aux chiffres ne sont pas présentes. L'utilisateur doit effectuer des mouvements avec sa tête pour déplacer un curseur sur un clavier virtuel flottant, les touches virtuelles sont activées en effectuant un geste de la main en l'air (similaire à un pincement de l'index avec le pouce, les autres doigts fermés).
- *Téléphone intelligent*, nommé ainsi, car l'interface utilise le clavier virtuel du téléphone intelligent en le connectant (par WiFi) au visiocasque de réalité augmentée. Par souci d'équité avec les deux autres interfaces comparées, les fonctionnalités d'autocorrection, suggestions de mots et saisie de mots par gestuelle étaient désactivées. Néanmoins, le texte saisi par l'utilisateur était doublement retranscrit autant sur l'interface visuelle du visiocasque de réalité augmentée que sur un champ de texte présent sur l'écran du téléphone intelligent, juste au-dessus du clavier virtuel.
- *Keycube*, pour cette étude, le keycube était connecté au téléphone intelligent en Bluetooth et ce dernier servant de relais d'information, était connecté au visiocasque de réalité augmentée en WiFi pour transmettre la saisie de texte.

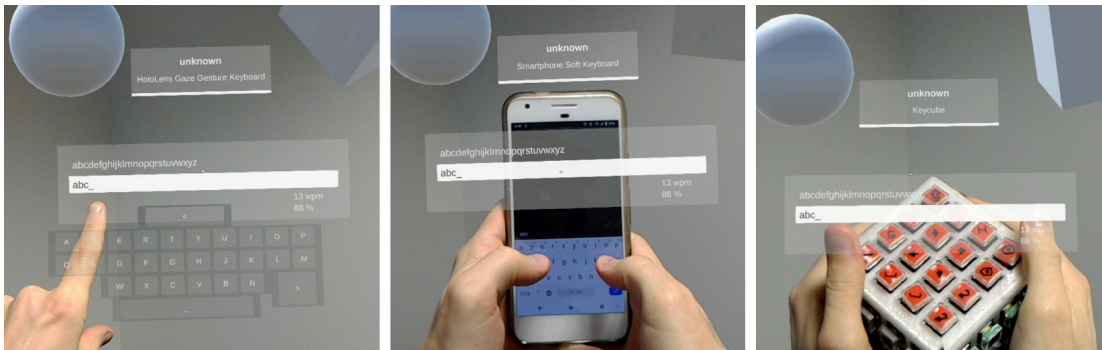


Figure 4.48: Interfaces visuelles de l'application dédiée à l'étude utilisateurs sur le visiocasque (de gauche à droite : avec le clavier virtuel, téléphone intelligent et keycube).

4.7.4 Procédure

Les participants étaient introduits individuellement à la procédure de l'expérimentation, ensuite ils devaient répondre à un questionnaire (Annexe D.7) puis saisir du texte avec le clavier traditionnel durant 5 minutes en étant assis devant un ordinateur portable, l'interface visuelle était similaire à celle présentée sur le visiocasque de réalité augmentée (Figure 4.48). Les participants étaient ensuite invités à réaliser trois sessions de 20 minutes de saisie de texte avec le visiocasque de réalité augmentée, en changeant d'interface à chaque fois après 5 minutes de pause. De façon similaire à l'étude précédente, aucune explication particulière ne fut donnée sur la disposition cubique des caractères pour le keycube et les participants devaient s'entraîner en saisissant l'alphabet une fois avec chacune des interfaces. Pour éviter les phénomènes d'entraînement, de fatigue et d'enchaînement, l'ordre de passage des interfaces a été contrebalancé entre les participants suivant le modèle du carré latin. Après chaque session de 20 minutes, les participants devaient remplir le questionnaire dédié au NASA-TLX (Annexe C.2) suivi de celui du SUS (Annexe C.1) pour mesurer respectivement la charge de travail et

l'utilisabilité des interfaces. Pour chacune des sessions de saisie de texte, les participants étaient libres de se déplacer, mais avaient comme instruction de rester debout (Figure 4.49).



Figure 4.49: Configuration de l'étude utilisateurs, un participant debout utilisant chacune des interfaces (de gauche à droite : *Visiocasque*, *Téléphone intelligent* et *Keycube*).

Après avoir répondu aux questionnaires succédant la dernière session, les participants étaient invités à saisir 13 phrases, une fois avec le keycube et une autre fois avec un clavier traditionnel. Dans les deux cas, les mains et les appareils étaient filmés avec 2 caméras pointant de chaque côté, afin de pouvoir analyser l'usage des doigts pour chacun des appuis. Les phrases proviennent du corpus utilisé lors des sessions de saisie de texte et sont présentées sur l'Annexe B.4, la première phrase est un pangramme³ servant juste d'entraînement. Au total, l'expérimentation a duré environ 120 minutes par participant.

3. Phrase comportant toutes les lettres de l'alphabet.

4.7.5 Résultats

Les résultats proviennent de l'analyse des traces produites par les participants, des réponses aux questionnaires et des enregistrements vidéos. Au total, 1353 phrases ont été saisies sur l'ensemble des interfaces (dont 481 avec le keycube), 3,3 % des phrases ont été exclues car elles avaient un taux d'erreur supérieur à 20 % causé par une validation prématurée.

Pour rappel, les formules de vitesse de saisie de texte, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère ainsi que les méthodes NASA-TLX et SUS sont présentés au début de l'état de l'art, partie 2.1.

4.7.5.1 Vitesse de saisie de texte

Les vitesses de saisie de texte absolues (en mots par minute) et relatives (en pourcentage) à celles du clavier traditionnel pour chacune des interfaces sont présentées sur la Figure 4.50. Avec une seule session de 20 minutes de pratique, les utilisateurs sont deux fois plus rapides avec le keycube qu'avec l'interface *Visiocasque* en atteignant une vitesse respective de 10,0 et 5,5 mots par minute, représentant 23,0 % et 12,5 % de leur vitesse de saisie de texte avec un clavier traditionnel (moyenne = 45,7 ; écart-type = 15,1). La vitesse de saisie de texte absolue avec l'interface téléphone intelligent reste supérieure avec une moyenne de 34,0 mots par minute (73,7 % du clavier traditionnel), un résultat attendu par l'intensive familiarité des participants avec l'interface. Une analyse de variance a montré que l'interface a un effet significatif sur la vitesse de saisie de texte ($F_{3,32} = 31,422; p < 0,05$). Une analyse *post hoc* en utilisant les tests de Student (t-tests) avec une correction Bonferroni a montré qu'il y a une différence significative des résultats entre chacune des interfaces excepté entre le téléphone intelligent et le clavier traditionnel ($p = 0,106$).

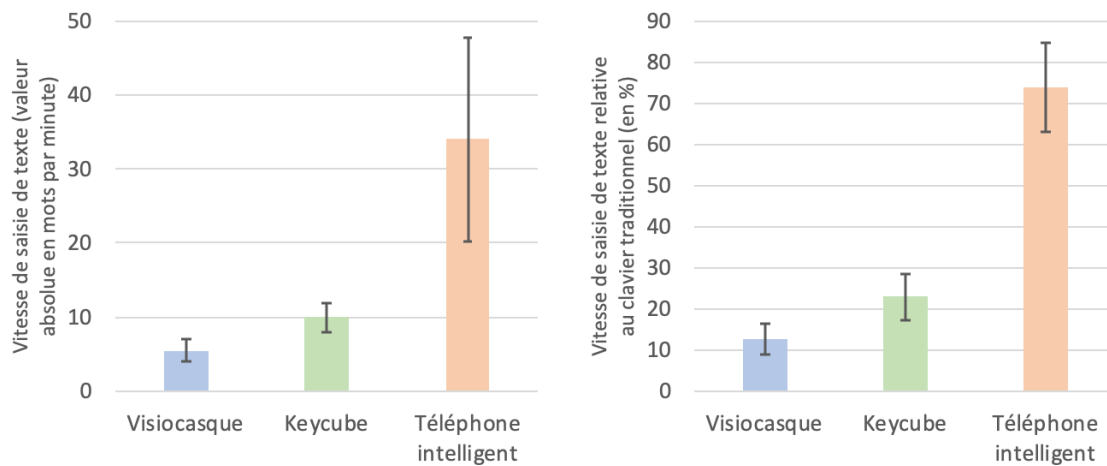


Figure 4.50: Vitesse de saisie de texte pour chaque interface en valeur absolue (mots par minute) à gauche et relative au clavier traditionnel à droite.

4.7.5.2 Taux d'erreur et nombre de frappes par caractère

Puisque les fonctionnalités de saisie de mots par gestuelle, de suggestion de mots et d'auto-correction étaient désactivées avec le clavier virtuel du téléphone intelligent, pour toutes les interfaces le nombre de frappes par caractère optimal était de 1,0 puis augmentait lorsqu'une erreur était corrigée.

Les taux d'erreur et nombres de frappes par caractères pour chaque interface sont présentés sur la Figure 4.51. Des analyses de variance ont montré que les interfaces n'ont pas d'effets significatifs sur les taux d'erreur ($p = 0,186$) et nombres de frappes par caractère ($p = 0,209$).

4.7.5.3 Charge de travail

La charge de travail a été mesurée avec la méthode NASA-TLX (Annexe C.2). Les scores du NASA-TLX par dimension et total (brut) sont présentés sur la Figure 4.52. Un score faible est souhaitable, car indique une faible charge de travail.

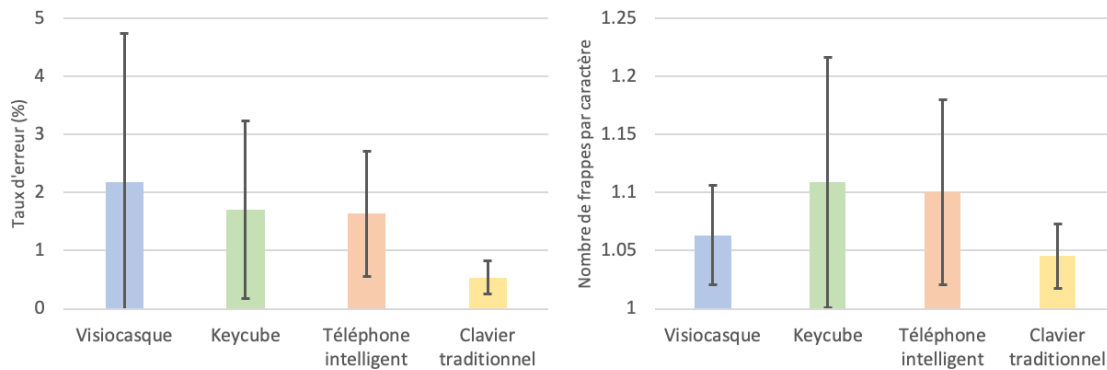


Figure 4.51: Taux d'erreur (gauche) et nombre de frappes par caractère (droite) pour chacune des interfaces.

Le score brut de la charge de travail pour l'interface *Visiocasque* (moyenne = 66,8 ; écart-type = 17,3) est sensiblement plus élevé (respectivement de 45 % et 58 %) que celui de l'interface *keycube* (moyenne = 46,0 ; écart-type = 11,3) et du téléphone intelligent (moyenne = 42,1 ; écart-type = 19,3).

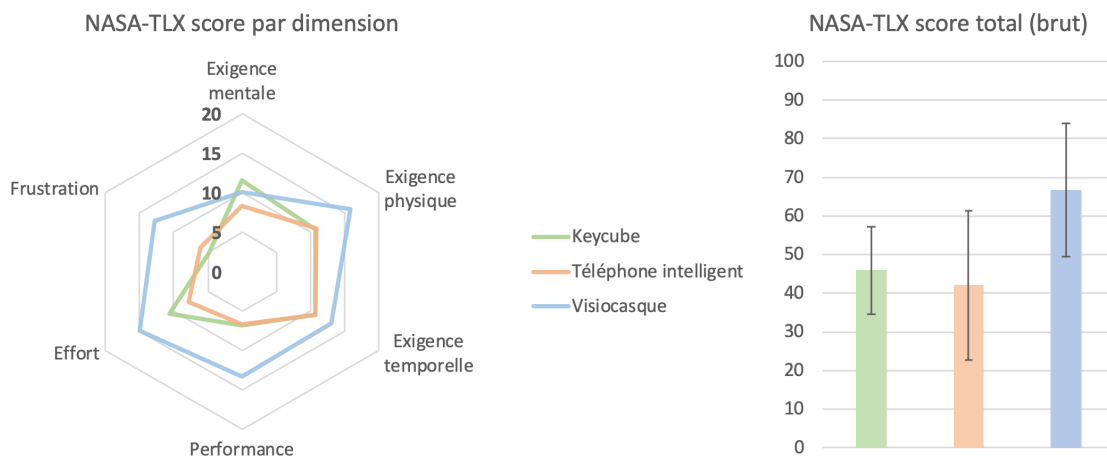


Figure 4.52: Charge de travail subjective rapportée par les scores du NASA-TLX pour chacune des interfaces : *Visiocasque*, *Téléphone intelligent* et *Keycube*.

4.7.5.4 Utilisabilité

L'utilisabilité a été mesurée avec la méthode SUS (Annexe C.1). Les scores du SUS pour chaque interface de saisie de texte sont présentés sur la Figure 4.53. Un score élevé est souhaitable, car il indique une forte utilisabilité.

Le score d'utilisabilité de l'interface *Visiocasque*, avec une moyenne de 45,8 (écart-type = 12,3), est considéré inacceptable et très inférieur (respectivement de 33 % et 38 %) à celui du keycube (moyenne = 68,9; écart-type = 12,2) et téléphone intelligent (moyenne = 73,9; écart-type = 19,0).

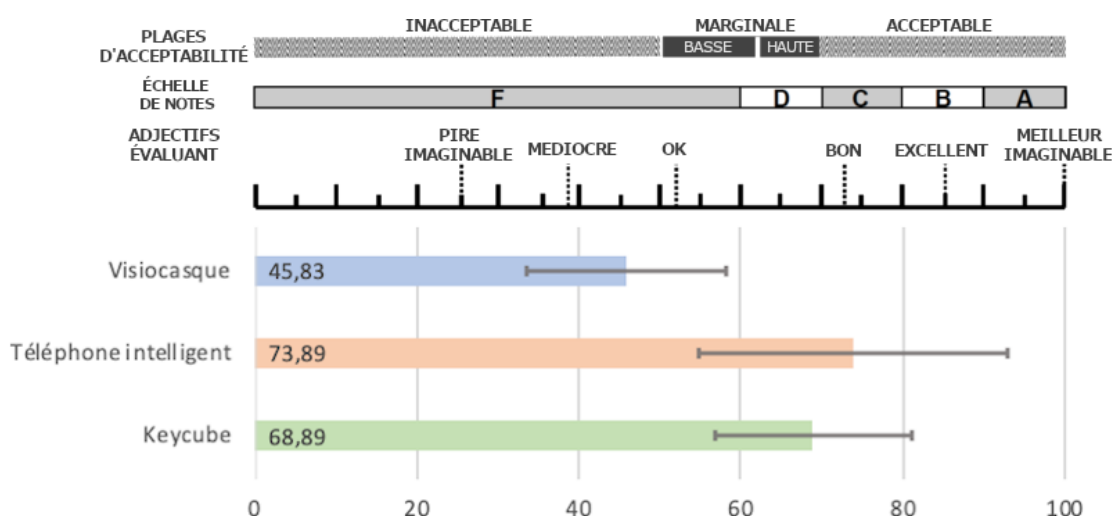


Figure 4.53: Score du SUS pour chaque interface avec les marges d'acceptabilité et les adjectifs qualificatifs, notre traduction (Bangor *et al.*, 2009).

4.7.5.5 Utilisation des doigts

Les résultats sur l'utilisation des doigts vis-à-vis du keycube et du clavier traditionnel proviennent de l'analyse des enregistrements vidéos (en réduisant leur vitesse à environ 5 %), le doigt et la touche correspondante de chaque appui furent enregistrés. Les enregistrements vidéos pour le clavier traditionnel d'un partici-

pant furent corrompus et une phrase d'un autre participant fut validée trop tôt sans être retranscrite, par conséquent l'analyse porte sur un total de 203 phrases et 6353 appuis de touches (en incluant les espaces, erreurs, corrections et validations).

Les taux d'utilisations des différents doigts lors de la saisie de texte avec le clavier traditionnel et le keycube (après une session de 20 minutes de pratique) sont présentés sur la Figure 4.54.

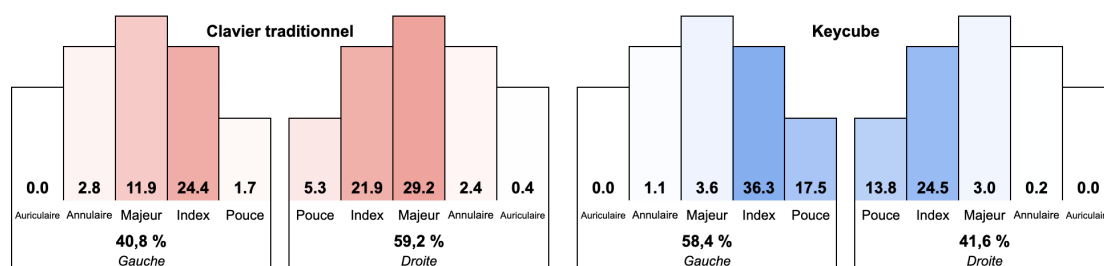


Figure 4.54: Taux d'utilisation des différents doigts lors de la saisie de texte avec le clavier traditionnel à gauche et le keycube à droite.

Nous avons relevé deux différences majeures entre les appareils :

1. Le léger déséquilibre d'utilisation des mains est inversé, avec 40,7 % / 59,3 % (gauche / droite) pour le clavier traditionnel, mais 58,4 % / 41,6 % avec pour le keycube.
2. Un décalage d'utilisation des doigts, en passant des majeurs et index pour le clavier traditionnel aux index et pouces pour le keycube. Ce décalage pourrait être perçu comme un avantage pour le keycube en considérant le pouce comme l'un des doigts les plus agiles (vitesse de réaction) de la main (Lachnit et Pieper, 1990).

Néanmoins, que ce soit avec le clavier traditionnel ou le keycube, à travers l'utilisation de l'ensemble des participants, 4 doigts sont principalement utilisés et répartis symétriquement entre la main gauche et la main droite. Les doigts les

plus utilisés pour le clavier traditionnel et pour le keycube sont respectivement le majeur droit (avec une moyenne de taux d'utilisation à 29,3 %) et l'index gauche (36,3 %). Ces appareils offrent une liberté d'utilisation des doigts pour appuyer sur les touches, ainsi, la moyenne des taux d'utilisations par doigt peut ne pas être représentative de la charge réelle effectuée par les participants. À cet égard, le Figure 4.55 rapporte par ordre décroissant les taux d'utilisations sans tenir compte du doigt choisi. Le keycube a montré un léger avantage avec un partage plus équilibré de la charge d'utilisation des doigts par rapport au clavier traditionnel, pour des utilisateurs novices avec le keycube (20 minutes de pratique) mais habitués à écrire avec un clavier traditionnel (utilisation quotidienne).

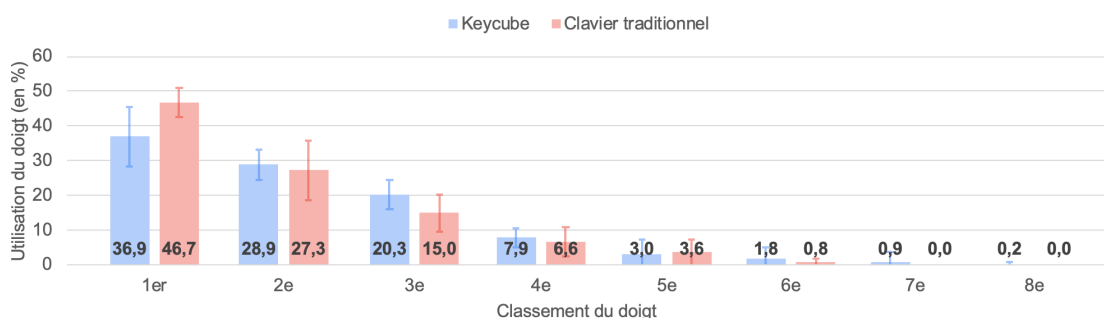


Figure 4.55: Moyenne des taux d'utilisation de tous les participants pour leur doigt le plus utilisé (1er) jusqu'à leur doigt le moins utilisé (8e), aucun participant n'a utilisé plus de 8 doigts.

Pour le clavier traditionnel, le taux d'utilisation maximum d'un doigt passe de 29,3 % (pour le majeur droit, Figure 4.54) à 46,7 % (Figure 4.55), signifiant qu'un seul doigt a saisi presque un caractère sur deux. Le taux d'utilisation maximum d'un doigt pour le keycube est inchangé, passant de 36,3 % (pour l'index gauche) à 36,9 %. Cette différence de taux d'utilisation désavantageuse pour le clavier traditionnel s'explique car l'appareil et l'expérience associée à celui-ci se traduisent par une utilisation disparate parmi les participants vis-à-vis du doigt appuyant sur telle ou telle touche (par exemple, certains utiliseront essentiellement leurs index,

tionnel. Nous observons des changements de mains sur certains appuis de touches, en passant de la main droite avec le clavier traditionnel à la main gauche avec le keycube pour l'espace (Esp.), mais aussi pour les touches dédiées aux lettres G et V, bien que ces dernières apparaissent comme étant plus utilisées avec l'index gauche pour le clavier traditionnel, le score combiné des autres doigts utilisés est légèrement plus important pour la main droite qu'avec la gauche. De plus, outre les changements volontaires (par nos critères de conception) de doigt le plus utilisé pour les 4 lettres centrales (T, Y, G, H) en passant normalement des index aux pouces, la main droite est la plus concernée par les changements de doigts les plus utilisés, en passant principalement du majeur à l'index (sauf les lettres B et N) entre le clavier traditionnel et le keycube. La partie dédiée à la main gauche est similairement plus utilisée avec l'index pour les deux appareils, à l'exception de la lettre Q, plus utilisée avec le majeur sur le clavier traditionnel.

Par ailleurs, bien que la saisie du keycube incite à utiliser plusieurs doigts, nous avons remarqué que les participants étaient aussi aptes à appuyer sur les touches en utilisant un seul doigt, souvent durant les premières minutes, en soutenant l'appareil de l'autre main de façon à rendre visibles et accessibles simultanément les trois faces dédiées aux lettres : bleu, rouge et jaune (Figure 4.57).

4.7.6 Discussion

Avec cette expérimentation, nous avons montré que les utilisateurs pouvaient utiliser l'interface keycube debout avec un visiocasque de réalité augmentée pour des performances similaires à celles de l'étude utilisateurs précédente en étant assis avec un ordinateur portable (partie 4.6). Une analyse de variance entre les résultats de la première session de l'étude précédente (S1) pour le groupe AZERTY et la session du keycube de cette étude a montré qu'il n'y avait aucune différence signi-

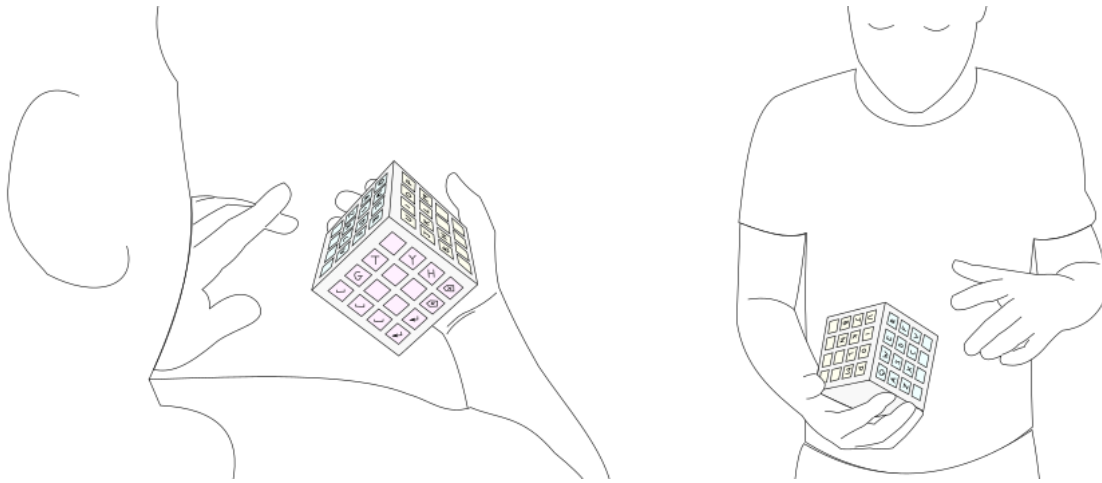


Figure 4.57: Utilisation d'un seul doigt pour appuyer sur les touches du keycube avec les trois faces (bleu, rouge et jaune) simultanément visibles et accessibles.

ficative pour la vitesse de saisie de texte ($p = 0,477$), le taux d'erreur ($p = 0,981$) et le nombre de frappes par caractère ($p = 0,283$).

Au-delà, des résultats similaires sur les sessions complètes, la Figure 4.58 présente une similitude de l'évolution intrasession concernant la vitesse de saisie de texte, le taux d'erreur et le nombre de frappes par caractères. Les sous-sessions sont créées en séparant dans l'ordre chronologique les phrases saisies d'une session en trois groupes de taille égale.

Par ailleurs, à l'intérieur d'une session complète, la Figure 4.58 fait ressortir une croissance moins importante entre les deux dernières sous-sessions (2 et 3) qu'avec les deux premières (1 et 2), laissant supposer que les participants ressentent une fatigue et la durée de 20 minutes pour une seule session pourrait être déjà trop longue et peu recommandée.

Nous n'avons pas mesuré la charge de travail et l'utilisabilité du clavier traditionnel des participants de cette étude utilisateurs, nous ne pouvons donc pas vérifier la cohérence avec les résultats des participants de l'étude utilisateurs pré-

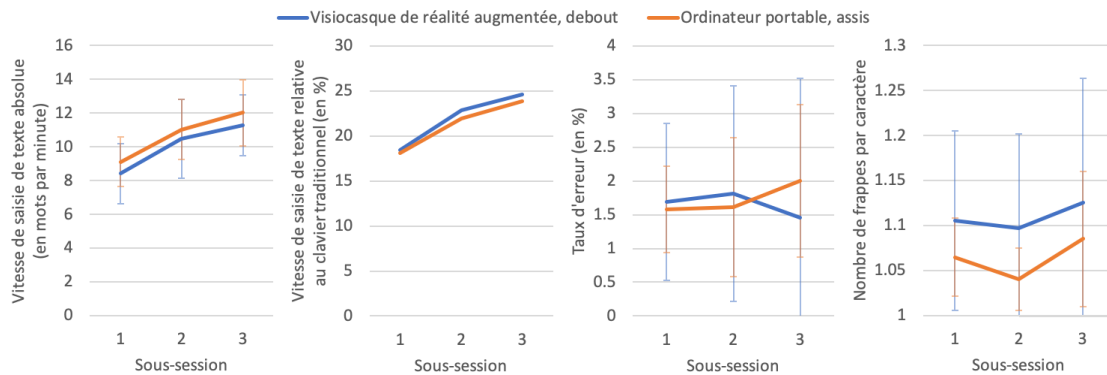


Figure 4.58: Comparaison de la vitesse de saisie de texte (absolue puis relative à celle du clavier traditionnel), du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère pour l'utilisation du keycube entre les conditions assis avec un ordinateur portable et debout avec un visiocasque de réalité augmentée.

cédente. Par conséquent, la comparaison de ces résultats avec les précédents est plus sensible, d'autant que ces derniers concernaient la dernière session du keycube (S5). Néanmoins, nous remarquons que les résultats sont similaires, tout en ayant une différence cohérente avec les procédures respectives employées. Pour cette expérimentation, il y a eu moins de sessions que la précédente (1 contre 5 avec le keycube), donc moins fatigante, la charge de travail est 13,4 % plus faible. Les scores d'utilisabilité des deux conditions (debout ou assis), entre cette étude utilisateurs et le groupe AZERTY de l'étude précédente sont équivalents avec respectivement 68,9 (écart-type = 12,2) et 69,1 (écart-type = 15,2).

En plus du clavier traditionnel, nous avons comparé l'interface keycube avec deux interfaces de base dédiées aux saisies de texte sur visiocasque de réalité augmentée : l'une basée sur les gestes de tête et d'une main en l'air et une autre basée sur le téléphone intelligent. Bien que nous attendions des résultats avantageux pour l'ensemble des mesures avec l'utilisation du téléphone intelligent (car les utilisateurs sont habitués à utiliser cette technique), le nombre de frappes par caractère, la charge de travail et l'utilisabilité ont été similaires à celle du keycube.

La différence majeure concerne la vitesse de saisie de texte, la moyenne des 20 premières minutes de pratique du keycube équivaut à 29,4 % de celle avec l'interface basée sur le téléphone intelligent. Outre leur précédente expérience avantageuse avec l'interface téléphone intelligent, durant l'expérimentation les participants bénéficiaient aussi d'un double retour visuel des phrases saisies, présentes autant sur le visiocasque de réalité augmentée que directement sur l'écran du téléphone intelligent, ainsi, les participants pouvaient saisir une phrase entière et la corriger en concentrant leur regard sur le téléphone intelligent. Néanmoins, cet avantage pour les performances de saisie de texte peut aussi être considéré comme une faiblesse pour l'expérience de réalité augmentée, cassant l'immersion en regardant le téléphone intelligent et non l'environnement de l'utilisateur.

Avec la seconde partie de l'expérimentation, nous avons mesuré et comparé l'usage des doigts avec le clavier traditionnel et le keycube. Nous avons montré que le keycube, même pour des novices, offre une charge d'utilisation par doigt similaire au clavier traditionnel et avantageux par rapport aux techniques de saisie de texte utilisant deux doigts (tels que les pouces avec les mini-claviers ou les claviers virtuels des téléphones intelligents). Ces dernières ont un taux d'utilisation de doigt maximal théorique de 50 % (au minimum, s'il y a un équilibre parfait entre les deux doigts), tandis que le keycube était utilisé avec environ 4 doigts et le plus chargé recevait un taux d'utilisation de 36 %.

Par ailleurs, l'analyse de l'utilisation des doigts a montré qu'avec le clavier traditionnel, les utilisateurs pouvaient adopter une stratégie de déplacement des mains pour utiliser plus couramment leur main droite (jugée plus habile, car tous les participants étaient droitiers) en débordant vers la gauche. Par exemple, les lettres centrales normalement dédiées à la main gauche, telles que G, V et B, sont finalement plus souvent utilisées avec la main droite. Cependant, cette stratégie est difficilement transposable avec le keycube, car la forme cubique implique une

séparation plus marquée entre la partie gauche et la partie droite. Par conséquent, l'utilisation d'une main pour telle ou telle touche semble plus stricte et le taux d'utilisation reflète finalement le rapport gauche-droite théorique calculé vis-à-vis des fréquences de la langue anglaise pour une disposition QWERTY (et AZERTY dans notre cas, le rapport gauche-droite étant inchangé), avec une charge de 57 % pour la main gauche (Noyes, 1983b).

4.8 Étude de cas : longitudinale

Le but de cette étude de cas est de donner un aperçu de l'évolution sur plusieurs sessions des performances en termes de vitesse de saisie de texte, de taux d'erreur et de nombre de frappes par caractères jusqu'à un début d'expertise *possible* du keycube. Étant une étude de cas, il n'est pas question de généralisation, mais uniquement de possibilité, un seul participant y a pris part, l'auteur de ce travail doctoral.

4.8.1 Participant

Le participant est un homme, gaucher, âgé de 32 ans. Il utilise le clavier traditionnel tous les jours sans avoir à regarder les touches. Ses précédentes expériences du keycube s'arrêtaient essentiellement à quelques démonstrations et réalisations de tests fonctionnels autant matériels que logiciels, donnant un avantage initial, sans pour autant avoir précédemment entrepris volontairement et intensivement des saisies de texte avec l'appareil.

4.8.3 Logiciel

L'expérimentation a impliqué le même logiciel que la précédente étude utilisateur fonctionnant sur le visiocasque de réalité augmentée, puis une autre application pour l'ordinateur portable a été conçu (Figure 4.59, droite), similaire à celle utilisée lors de la troisième étude utilisateurs et permettait d'afficher le visualiseur mise à jour en noir et blanc, mais aussi de saisir des phrases non plus avec une barre d'écoulement du temps, mais avec un compteur de phrase. Les phrases utilisées provenaient d'un ensemble de phrases facilement mémorables régulièrement utilisé pour mesurer des interfaces de saisie de texte, mais incluant cette fois, des chiffres, de la ponctuation (limité aux points, points d'exclamation et d'interrogation) et des majuscules (Vertanen et Kristensson, 2011).

4.8.4 Procédure

Le participant a effectué 40 sessions de saisie de texte avec le keycube neutre (noir et blanc) limité à 20 phrases chacune, puis deux sessions finales de 20 minutes avec le keycube AZERTY coloré et connecté sans fils, l'avant-dernière en étant assis avec l'ordinateur portable, puis dans les mêmes conditions que l'étude utilisateurs précédente (avec le visiocasque de réalité augmentée, debout, en retranscrivant un ensemble de phrases uniquement composées de lettre de l'alphabet) pour la dernière session. Les 40 premières sessions composées des 20 phrases uniquement ont été effectuées par paire dans la même journée, avec une première session en début ou milieu de journée, puis la deuxième en fin de journée, représentant au total 20 journées. Les deux dernières sessions de 20 minutes ont été effectuées sur des journées séparées. Par ailleurs, nous avons pris la liberté d'effectuer trois autres changements de conditions mineurs vis-à-vis des sessions :

1. Les 20 premières sessions ont été effectuées avec le visualiseur, puis sans

retour visuel du keycube (virtuel) pour toutes les sessions suivantes. L'aide visuelle est considérée bénéfique au début de l'apprentissage de compétences psychomotrices (Fleishman et Rich, 1963) nécessaire à la saisie de texte avec le keycube.

2. Après la 30^e session, nous avons effectué une mise à jour du logiciel exécuté sur le microcontrôleur des keycubes pour implémenter un système d'anti-rebond afin de diminuer le problème des répétitions de caractères reportés dans les précédentes études utilisateurs. Pour éviter les rebonds (transition d'un état à l'autre) des touches, nous avons inclus un délai (seuil à dépasser) avant de tenir compte des changements d'états du bouton, ainsi tous les rebonds effectués avant le délai sont ignorés. Une analyse des écarts de temps sur l'ensemble des caractères répétés (y compris ceux désirés liés au vocabulaire saisi) des sessions précédentes fait ressortir des valeurs aberrantes avec une quantité importante (31,5 %) de répétition effectuée en moins de 5 millisecondes, nous avons défini le délai à 25 millisecondes par sécurité, tout en restant suffisamment bas pour ne pas ralentir le rythme de la saisie de texte.
3. Le participant a effectué une pause de 5 jours entre les sessions 30 et 31 puis 41 et 42 pour observer la rétention de la compétence.

L'ensemble des changements de conditions pour chaque session est résumé (et schématisé) sur la partie centrale de la Figure 4.60 rapportant les résultats.

4.8.5 Résultats

Les résultats proviennent des traces. Au total, 1092 phrases ont été saisies, les phrases avec un taux d'erreur supérieur à 20 % ont été exclues, souvent causées par une validation précipitée, elles représentent 2,28 % de l'ensemble.

L'évolution de la vitesse de saisie de texte absolue (en mots par minute) et relative par rapport au clavier traditionnel est reportée sur la partie supérieure de la Figure 4.60. La vitesse de saisie de texte de l'utilisateur avec un clavier traditionnel était 86,8 mots par minute pour les phrases simples et 81,7 mots par minute pour l'ensemble des phrases incluant la ponctuation, les chiffres et les majuscules.

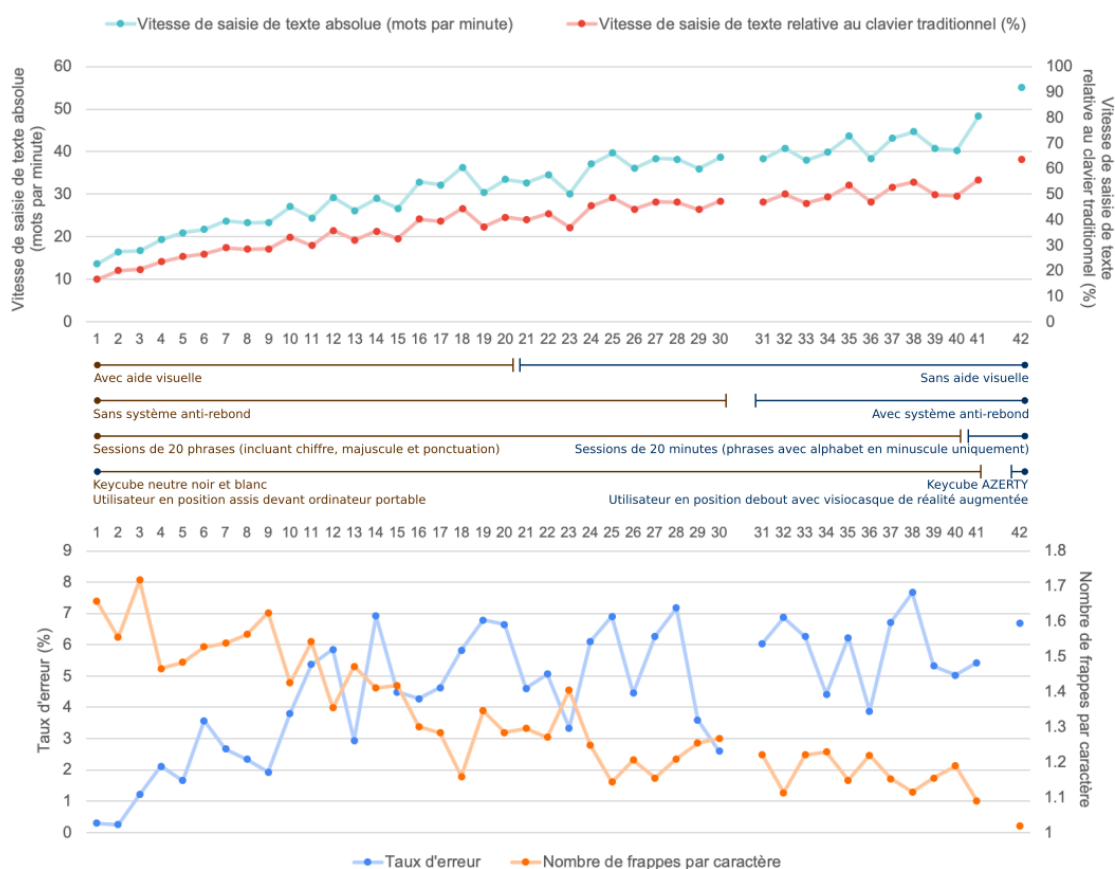


Figure 4.60: Évolution par session de la vitesse de saisie de texte absolue et relative au clavier traditionnel, du taux d'erreur et du nombre de frappes par caractère. Les coupures (espaces) des courbes représentent des pauses de 5 jours entre les sessions (30, 31 et 41, 42).

La vitesse de saisie de texte a progressivement augmentée de 13,6 à 44,7 mots par minute pour les 40 sessions de 20 phrases, soit une progression de 329 % pour un temps d'entraînement total d'environ 175 minutes (en passant de 9 à 3 mi-

minutes par session). Avec environ 100 minutes d'entraînement cumulées (similaire à la troisième étude utilisateurs), le participant a atteint une vitesse de 36,3 mots par minute (session 18). Pour les deux dernières sessions de 20 minutes, en étant respectivement assis avec un ordinateur portable puis dans les mêmes conditions que l'étude utilisateurs précédente (debout, avec le visiocasque de réalité augmentée) le participant a atteint une vitesse de saisie de texte de 48,4 et 55,1 mots par minute. La vitesse de saisie de texte du keycube relative à celle du clavier traditionnel a évolué entre 16,6 et 63,5 %.

Le taux d'erreur et le nombre de frappes par caractère sont rapportés sur la partie inférieure de la Figure 4.60. Le taux d'erreur a augmenté jusqu'à la session 12, passant de 0,29 % à 5,85 %, néanmoins il finit par se stabiliser, avec une moyenne de 5,44 % sur l'ensemble des sessions suivantes. Simultanément, le nombre de frappes par caractère a diminué continuellement entre la première et dernière session, signifiant que l'utilisateur corrigeait de moins en moins ses erreurs et qu'elles étaient de moins en moins nombreuses.

L'utilisateur a rapporté n'avoir pas regardé le keycube pour l'ensemble de l'expérimentation, à l'exception de très rares occasions, jugées accidentelles. Le keycube neutre étant dépourvu des inscriptions des caractères, le bénéfice visuel de l'appareil était limité. De plus, les premières sessions étaient supportées par le visualiseur, par conséquent, l'utilisateur a adopté une stratégie d'essai-erreur (et parfois correction) maintenue jusqu'à la dernière session, y compris pour celles incluant le keycube AZERTY coloré.

4.8.6 Discussion

En comparaison avec les études utilisateurs 3 et 4, le participant avait comme désavantage :

- Saisir des phrases plus compliquées incluant des chiffres, de la ponctuation et des majuscules.
- Utiliser un keycube neutre (dépourvu d'inscriptions des caractères).
- Utiliser régulièrement un clavier traditionnel entre chacune des sessions.

Le participant avait comme avantage :

- Avoir précédemment manipulé le keycube pour réaliser des brèves démonstrations et tests fonctionnels.
- Une connaissance parfaite de la disposition cubique des caractères dès la première session.
- Commencer avec un retour visuel interactif.
- Pratiquer pendant des sessions plus courtes.

Néanmoins, nous pensons que l'avantage principal du participant fut de savoir saisir du texte avec un clavier traditionnel sans regarder l'appareil, par l'intermédiaire de la mémoire musculaire, maximisant ainsi le transfert de connaissance.

La vitesse de saisie du texte relative au clavier traditionnel de l'utilisateur a atteint 63,5 % lors de la dernière session (150 phrases saisies pendant 20 minutes avec un visiocasque de réalité augmentée) et la valeur absolue avec 55,1 mots par minute est supérieure aux moyennes de la vitesse de saisie de texte des participants des précédentes études utilisateurs avec un clavier traditionnel, 52,2 mots par minute (pour 33 participants), ou avec un clavier virtuel sur téléphone intelligent connecté à un visiocasque de réalité augmentée, 34,0 mots par minute (pour 9 participants). Les résultats de cette étude utilisateur sont particulièrement encourageants et montrent que l'interface keycube peut offrir aux utilisateurs la possibilité de s'améliorer sur le moyen et long terme.

4.9 Conclusion, limites et perspectives

Nous avons conçu et implémenté le keycube, une nouvelle interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée dédiée aux environnements de travail de bureau. L'interface est basée sur la transformation de la forme du clavier traditionnel, en passant d'une surface plane à un cube, avec pour but principal de conserver les avantages du clavier traditionnel tout en ajoutant la caractéristique manquante pour apprécier des expériences de réalité augmentée : la mobilité. L'interface keycube est un appareil cubique (environ 9 cm de côté) composé de 80 boutons physiques, rangés par matrice (de 4x4) sur 5 faces du cube. La taille des boutons, leur force d'activation, les espacements entre eux et par conséquent la taille globale de la structure ont été définis suivant la littérature scientifique et la normalisation des claviers traditionnels. L'interface keycube inclut aussi un écran tactile, une centrale inertielle, un moteur-vibreux et un module de communication sans fil.

Pour concevoir la disposition cubique des caractères, nous avons d'abord mené deux études utilisateurs. La première, avec 31 participants, a permis de définir la position préférée de saisie de l'appareil : *en diagonale*, les avant-bras légèrement fléchis, les deux mains enveloppent l'appareil, les paumes contre deux arêtes du cube, la face dépourvue de boutons physiques est dirigée vers le bas. La seconde, avec 22 participants, a permis de cartographier les zones de préférences et d'accessibilités des doigts vis-à-vis des touches de l'appareil lorsque ce dernier est saisi *en diagonale*. Nous avons ensuite associé les résultats de ces études utilisateurs avec la littérature scientifique pour concevoir une disposition cubique des caractères basée sur la disposition traditionnelle QWERTY, afin notamment de bénéficier d'un transfert de connaissance.

Nous avons ensuite mené trois études utilisateurs pour mesurer différents critères

de performances des utilisateurs du keycube lors d’une activité de saisie de texte. Tout d’abord, dans un environnement réel, en utilisant l’appareil assis, connecté à un ordinateur portable, 24 participants ont été répartis équitablement en 3 groupes, chacun avec une disposition cubique des caractères différente, basée sur le QWERTY, l’AZERTY et sur une disposition inconnue. Nous avons confirmé que la disposition cubique basée sur le QWERTY ou AZERTY bénéficie d’un transfert de connaissance des utilisateurs habitués aux claviers traditionnels, avec des différences positives vis-à-vis de la disposition inconnue très prononcées pour la vitesse de saisie de texte (du simple au double) et les scores d’utilisabilité (différence de 30 %). De plus, les utilisateurs ont réalisé une progression constante sans atteindre de plateau en manipulant le keycube pendant 5 sessions de 20 minutes, atteignant ainsi 19 mots par minute, représentant 30 % de leur vitesse de saisie de texte avec clavier traditionnel. Avec la 4^e étude utilisateurs, nous avons montré que (1) l’interface keycube s’utilisait indifféremment en étant assis ou debout avec un visiocasque de réalité augmentée et (2) le nombre et la charge (taux d’utilisation) des doigts d’utilisateurs novices du keycube étaient similaires à ceux utilisant le clavier traditionnel quotidiennement, avec environ 4 doigts utilisés au maximum à 36 %. Enfin, avec la dernière étude utilisateur, nous avons mesuré l’évolution de la vitesse de saisie de texte d’un seul participant, jusqu’à un début d’expertise, atteignant 55 mots par minute, en 42 sessions (moins de 4 heures d’utilisation répartie sur 1 mois).

Nous avons identifié plusieurs limites et perspectives à court terme liées à l’interface keycube.

- **Effort physique.** À l’instar de l’interface ControlWear, nous n’avons pas précisément mesuré et comparé l’effort physique, en particulier certains membres du corps, tel que les doigts, mains et bras. Les mesures des dimensions *Exigences physique* et *Effort* du NASA-TLX sont limitées, car

les échelles manquent de repères verbaux (par exemple, des adjectifs qualifiant la fatigue ressentie) et ne permettent pas de segmenter précisément par membre. Nous prévoyons de réaliser d'autres études utilisateurs pour faire ressortir l'effort physique en utilisant des mesures qualitatives standardisées telles que les échelles Borg RPE et CR10 (Borg, 1998) ou avec des mesures objectives basées sur différentes données physiologiques (telles que les pulsations cardiaques ou l'activité musculaire détectées avec l'électromyographie⁴).

- **Hétérogénéité des caractères.** Excepté lors de la dernière étude utilisateur impliquant de la ponctuation, des majuscules et des chiffres, nous avons limité la saisie de texte à des phrases comprenant uniquement les lettres de l'alphabet en minuscule (soit 29 caractères différents en incluant l'espace, la validation et la correction). Néanmoins, lors d'une activité de saisie de texte (par exemple, pour la conception et le développement de logiciel) de nombreux caractères spéciaux sont saisis. Nous envisageons de réaliser d'autres études utilisateurs pour faire ressortir et comparer l'utilisation des caractères spéciaux entre le keycube et d'autres interfaces.
- **Expertise.** Le début d'expertise mesurée par la dernière étude utilisateur n'est pas généralisable, l'approche méthodologique et la valeur scientifique de cette étude restent à être démontrées, car un seul participant a pris part à l'expérimentation. Nous envisageons de mener une étude utilisateurs pour faire ressortir l'évolution des compétences jusqu'au niveau expert (lorsque les performances atteignent un plateau) du keycube, en segmentant les participants par leur niveau initial d'expertise du clavier traditionnel, en particulier pour séparer ceux pouvant déjà saisir du texte sans regarder

4. Mesure des potentiels électriques émis par le muscle lors d'une contraction, le plus souvent à l'aide d'électrode (conducteur électronique) placée en surface, sur la peau.

les touches à appuyer. À cet égard, nous envisageons aussi d'employer des stratégies formelles pour montrer qu'on peut utiliser le keycube sans avoir à concentrer son regard sur l'appareil, par exemple, en le recouvrant d'un tissu.

- **Tutoriel.** Nous avons volontairement limité les explications d'utilisation du keycube données aux participants, nous montrions essentiellement la saisie de l'appareil, durant quelques secondes, sans même évoquer la disposition cubique des caractères. Nous envisageons de concevoir puis étudier un outil pédagogique (tutoriel) et ludique pour accélérer significativement l'apprentissage du keycube, utilisant notamment le visualiseur avec différents niveaux de difficulté progressifs, à pratiquer durant une brève période, telle que 60 minutes.

CHAPITRE V

CONCLUSION

L’objectif global de cette thèse est de contribuer à la démocratisation des visiocasques de réalité augmentée. Ce sujet a été abordé d’un point de vue interactions humain-machine à travers les problématiques de la saisie de texte. En effet, cette tâche est importante et omniprésente dans de nombreux milieux professionnels, pour autant les interfaces incluses et proposées avec les visiocasques présentent des faiblesses et ne répondent pas à leur contexte d’utilisation. À cet égard, nous avons conçu puis étudié deux interfaces de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée, ControlWear et keycube, ayant pour objectif d’être adaptées respectivement aux environnements industriels et de bureau. Nous synthétisons dans ce chapitre les principales contributions et dégageons des perspectives à ces travaux.

5.1 Contributions

Les contributions de cette thèse sont de natures différentes et se situent dans trois catégories (parmi sept) souvent référencées dans le domaine des interactions humains-machine (Wobbrock et Kientz, 2016) : *Méta-analyse* (examination et synthèse des autres travaux), *Artéfact* (création et réalisation d’artefacts interactifs) et *Empirique* (expérimentation, observation et collecte de données).

5.1.1 Méta-analyse

Ce travail de thèse contribue aux connaissances par l'apport de trois états de l'art.

Pour appuyer et préciser la problématique et les hypothèses, ce travail de thèse inclut un état de l'art principal sur l'ensemble des interfaces de saisie de texte pour visiocasque. Ces interfaces ont été catégorisées suivant l'utilisation ou non d'appareils supplémentaires externes au visiocasque, puis respectivement sous-catégorisées suivant le type d'appareil (par exemple, des manettes ou une paire de gants) et suivant la gestuelle nécessaire pour saisir du texte (par exemple, un geste de la tête ou des mains).

Ensuite, nous avons réalisé deux autres états de l'art, plus spécifiques à nos hypothèses, l'un concernant les interfaces de saisie de texte pour montre connectée, catégorisées par l'utilisation ou non de l'écran tactile, puis respectivement sous-catégorisées suivant le type d'appuis (continue ou discret) et suivant la caractéristique des autres composants utilisés (tangible ou non tangible).

Le dernier état de l'art spécifique concerne les appareils interactifs de forme cubique, catégorisés par leur usage : la manipulation tridimensionnelle, la navigation de contenu virtuel et l'apprentissage.

5.1.2 Artéfact

Ce travail de thèse contribue aux connaissances par l'apport de deux concepts et implémentations d'interfaces de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée : ControlWear et keycube.

ControlWear est une nouvelle interface de saisie de texte basée sur l'utilisation combinée d'un visiocasque de réalité augmentée et d'une montre connectée. L'in-

terface intègre deux techniques, l'une basée sur l'écriture manuscrite depuis l'écran tactile de la montre connectée et l'autre, multimodale, mélange les mouvements de la tête avec un appui simple sur l'écran tactile.

Keycube est un nouvel appareil de saisie de texte, basé sur une transformation de forme du clavier traditionnel, en passant d'une surface plane à un cube afin de supprimer son principal inconvénient, l'immobilité, tout en gardant autant que possible ses caractéristiques avantageuses, une taille et quantité suffisante de touches, une possibilité d'utiliser plusieurs doigts, de réaliser des combinaisons et une liberté du regard.

Les deux interfaces, ControlWear et keycube sont respectivement dédiées à deux environnements de travail différents : industriel et de bureau, néanmoins les deux interfaces sont compatibles et peuvent être considérées comme complémentaires.

5.1.3 Empirique

Ce travail de thèse contribue aux connaissances par l'apport de données empiriques, basées sur l'expérimentation, l'observation de l'utilisation des interfaces proposées, ControlWear et keycube.

Nous avons eu l'opportunité de mener plusieurs études utilisateurs (8 au total), autant pour assister la conception desdites interfaces que pour les comparer dans différents contextes et suivant plusieurs critères standardisés, tels que la vitesse de saisie de texte, le taux d'erreur, le nombre de frappes par caractère, la charge de travail et l'utilisabilité. De plus, pour nos études utilisateurs mesurant les performances des interfaces ControlWear et keycube, nous avons inclus dans les plans expérimentaux (1) des interfaces référentielles (tel que le clavier traditionnel) pour faciliter les comparaisons avec l'état de l'art et (2) des différentes situations d'utilisations (tel qu'assis ou debout).

Par ailleurs, les résultats de nos études utilisateurs nous permettent de prendre position vis-à-vis de nos deux hypothèses.

Hypothèse 1

- Le visiocasque de réalité augmentée et la montre connectée forment un couple pertinent pour proposer une interface de saisie de texte efficace dans un environnement de travail industriel.

En l'état, c'est une affirmation délicate, car nous n'avons pas réussi à montrer d'effets significatifs positifs en termes de saisie de texte, de taux d'erreur et de nombre de frappes par caractère de l'interface ControlWear par rapport à l'interface référentielle basée sur les mouvements de la tête et des gestes de la main en l'air. Plus précisément, la technique basée sur l'écriture manuscrite fut la moins performante par rapport à la technique multimodale et l'interface référentielle, avec respectivement 4,3 mots par minute contre 6,1 et 6,2. Cependant, lors d'une expérimentation des interfaces en situation quasi réelle avec des utilisateurs dans leur environnement de travail, les scores d'utilisabilité, de charge de travail et d'expérience utilisateur de la technique multimodale de ControlWear se sont montrés nettement favorables par rapport à l'interface référentielle et la technique manuscrite. Par ailleurs, pour accentuer l'incertitude de notre première hypothèse, malgré la courte période de pratique par les participants, la technique manuscrite a montré la meilleure progression des performances. De plus, bien qu'aucune des quatre situations (en étant debout, couché, avec les mains occupées et dans un espace restreint) testées n'a eu d'effets significatifs sur les performances des trois interfaces, les scores de préférence des interfaces ont montré que la technique manuscrite était particulièrement avantageuse lorsque l'utilisateur est couché puis que les deux techniques de l'interface ControlWear étaient préférées dans des espaces restreints. Ces résultats montrent qu'il y a des voix d'explorations pour ce type d'interface en termes de situations.

Hypothèse 2

- La transformation de forme du clavier traditionnel en passant d’une surface plane à une structure cubique représente une interface de saisie de texte pour visiocasque de réalité augmentée efficace dans un environnement de travail de bureau.

Nous estimons que les résultats des études utilisateurs du Keycube appuient cette affirmation. Tout d’abord, nous retiendrons que la tenue du keycube la plus appropriée pour la saisie de texte est *en diagonale* (les arêtes de l’appareil contre les paumes de main) et dans ces conditions, une disposition cubique des caractères basée sur le QWERTY est préférable (due au transfert de connaissance, avec un rapport de performance du simple au double) vis-à-vis d’une disposition inconnue par les utilisateurs. Ainsi, sans aucune aide, les utilisateurs novices du keycube commencent avec 10 mots par minute, et vont rapidement jusqu’à 19 mots par minute en l’espace de 100 minutes de manipulation dans la même demi-journée, soit 30 % de leur vitesse avec un clavier traditionnel. De plus, l’esquisse d’une étude longitudinale laisse entrevoir une vitesse de saisie de texte supérieure à 50 mots par minute en moins de 4 heures de pratique réparties sur environ un mois. Les expérimentations ont aussi montré que (1) les utilisateurs du keycube ont des performances similaires en étant assis devant un écran ou debout avec un visiocasque de réalité augmentée et (2) le keycube est utilisable avec plusieurs doigts, ces derniers ayant même des taux d’utilisations avantageux (meilleure répartition) par rapport au clavier traditionnel. Par ailleurs, nous avons conçu des modèles d’accessibilités et de préférences des doigts des utilisateurs vis-à-vis des surfaces d’une forme cubique lorsque cette dernière est tenue *en diagonale*.

5.2 Perspectives

Nous avons identifié plusieurs perspectives à nos travaux, vers d'autres enjeux, au-delà du cadre de cette thèse.

- **Réalité virtuelle.** Nous envisageons d'étudier le keycube avec des visio-casques proposant des expériences de réalité virtuelle. Dans ces conditions, l'appareil ne sera que très rarement directement visible. Nous pensons que la forme du keycube annihile les mouvements de mains latéraux et améliore sa perception tactile vis-à-vis d'un clavier traditionnel, requérant ainsi peu de retours visuels. Néanmoins, nous utiliserons des caractéristiques de l'appareil inexplorées dans cette thèse, notamment la centrale inertielle pour corrélérer les mouvements du keycube avec un rendu virtuel.
- **Enfants.** Nous envisageons de mener des études utilisateurs du keycube avec des participants sans connaissances *a priori* de disposition des caractères, tels que des enfants n'ayant jamais été en contact avec un clavier traditionnel, pour notamment mesurer les différences d'appréhension entre les deux appareils. L'état de l'art spécifique aux appareils cubiques a montré que cette forme est particulièrement adaptée pour les enfants, l'appareil pourrait ainsi jouir d'un avantage préférentiel sur la maniabilité et la ludicité, avec des conséquences positives sur l'acquisition de compétences de saisie de texte.
- **Contexte d'utilisation.** Nous envisageons d'adapter et étudier les interfaces ControlWear et keycube pour d'autres contextes d'utilisations, que ce soit avec un changement d'environnement (par exemple pour exploiter la discrétion de l'interface ControlWear dans des espaces publics, tels qu'un musée, un bar ou un abribus) ou avec un changement de tâche (par exemple pour la manipulation tridimensionnelle de contenu virtuel avec le keycube).

- **Communauté.** Nous pensons que la recherche ne doit pas s'arrêter à la publication scientifique. Pour l'interface ControlWear cela se traduit par un transfert de connaissance avec le partenaire industriel. Pour l'interface keycube, nous estimons que son implémentation actuelle est fonctionnelle en l'état, par conséquent, nous envisageons de concevoir et partager plusieurs vidéos et applications ludiques allant au-delà de son usage originel pour susciter l'intérêt de l'appareil. Dans le meilleur des cas, nous essayerons de créer une modeste communauté pour organiser des concours locaux de rapidité (en vitesse de saisie de texte) à l'instar de ceux dédiés aux machines à écrire ou à la résolution du puzzle Rubik's Cube.

Enfin, à l'exception de cette phrase, ce dernier chapitre contient 10 398 caractères (hors spéciaux et chiffres) retranscrits à une vitesse moyenne de 46,1 mots par minute, évidemment, en étant debout, avec un keycube...

APPENDICE A

PROJET CARTON

Le projet CARTON rassemble des outils matériels et logiciels libres afin de transformer un téléphone intelligent en visiocasque de réalité augmentée dans le but de démocratiser cette technologie. Nous présentons dans cette annexe seulement le nécessaire à la construction de la première version de l'appareil (Figure A.1), pour plus d'information sur le processus de création, les fonctionnalités, la seconde version, la partie logicielle ou les expérimentations, veuillez vous référer au site officiel¹ et aux publications scientifiques.

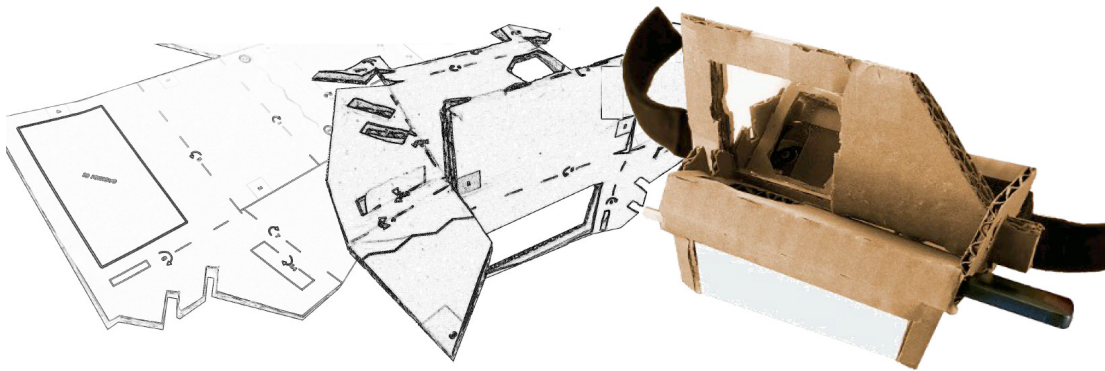


Figure A.1: Projet *CARTON* : conception et construction.

1. <https://mobicarton.github.io>

A.1 Requis

Outre le téléphone intelligent, la construction requiert seulement des outils standards puis des matériaux simples d'accès et peu onéreux.

A.1.1 Outils

- 1 couteau à lame rétractable
- 1 paire de ciseaux
- 1 tube de colle
- 1 règle

A.1.2 Matériaux

- 1 exemplaire d'impression des plans (3 feuilles)
- 1 morceau de carton (standard, 2/3 mm d'épaisseur)
- 1 morceau de feuille plastique transparent
- 1 agitateur de boisson plat en bois (pour éviter les déformations de la visière)
- 1 morceau de miroir
- 1 éponge (pour adoucir le port du visiocasque)
- 1 sangle extensible
- 1 élastique (pour retenir le téléphone intelligent)
- du ruban adhésif
- du ruban adhésif double face

A.2 Plan

L'échelle des plans est réduite à 1/2 (50%).

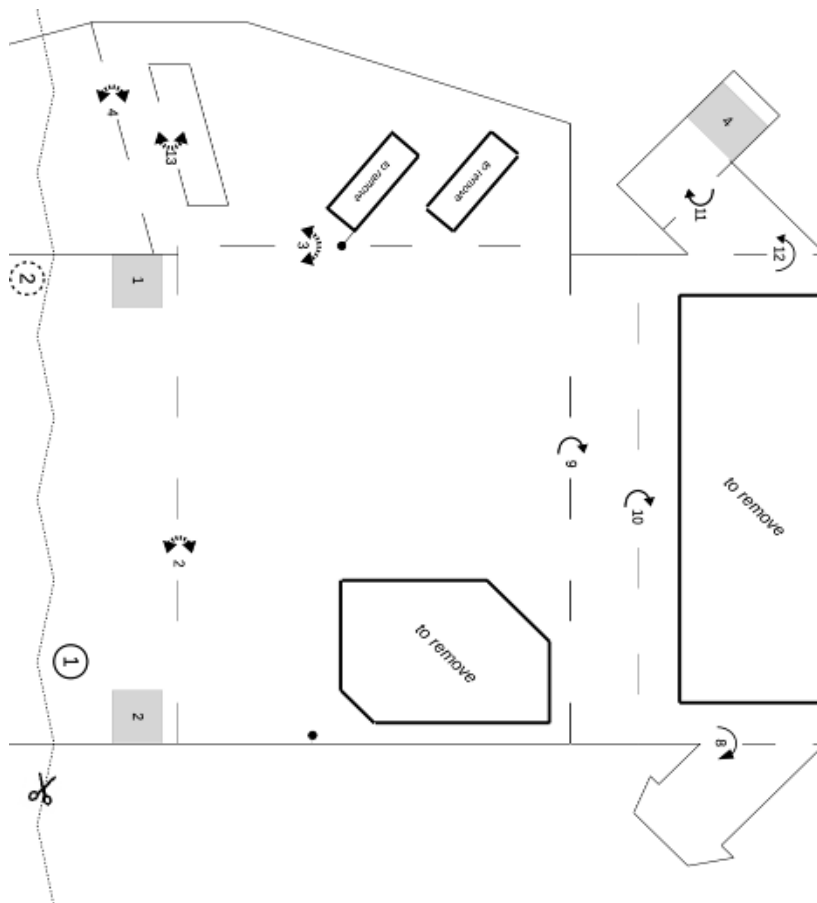


Figure A.2: Plan de la structure principale (1/2) du *CARTON* à imprimer sur une feuille de format AA ou Lettre.

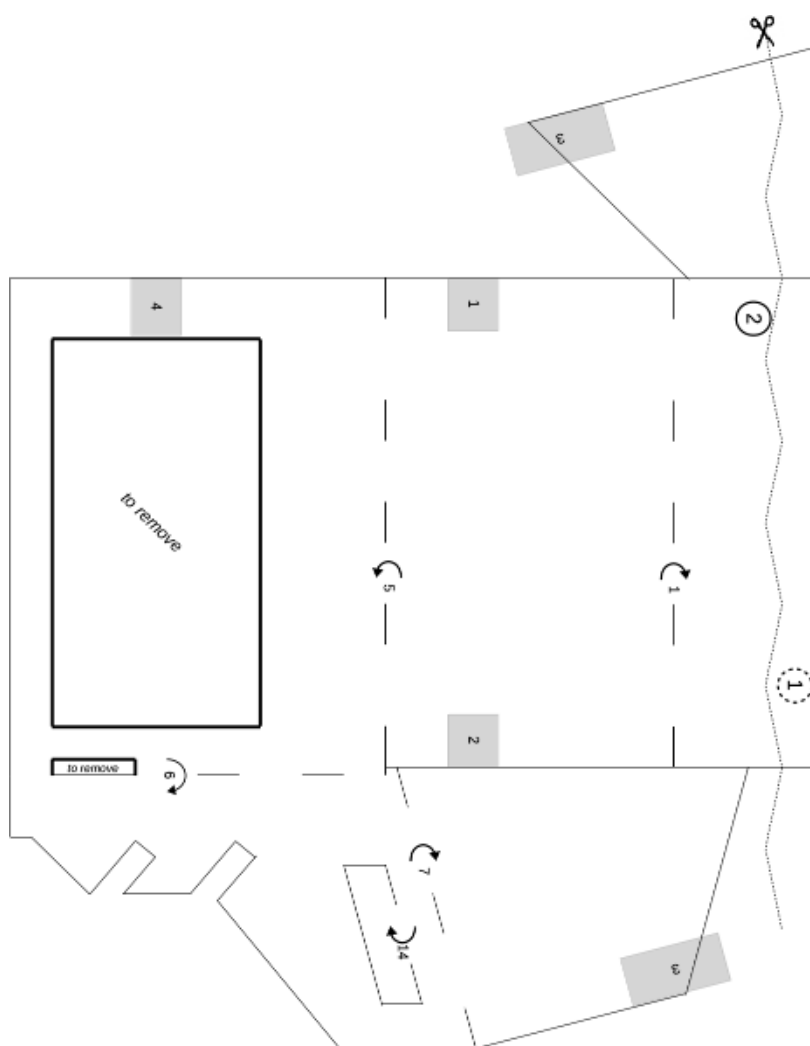


Figure A.3: Plan de la structure principale (2/2) du *CARTON* à imprimer sur une feuille de format AA ou Lettre.

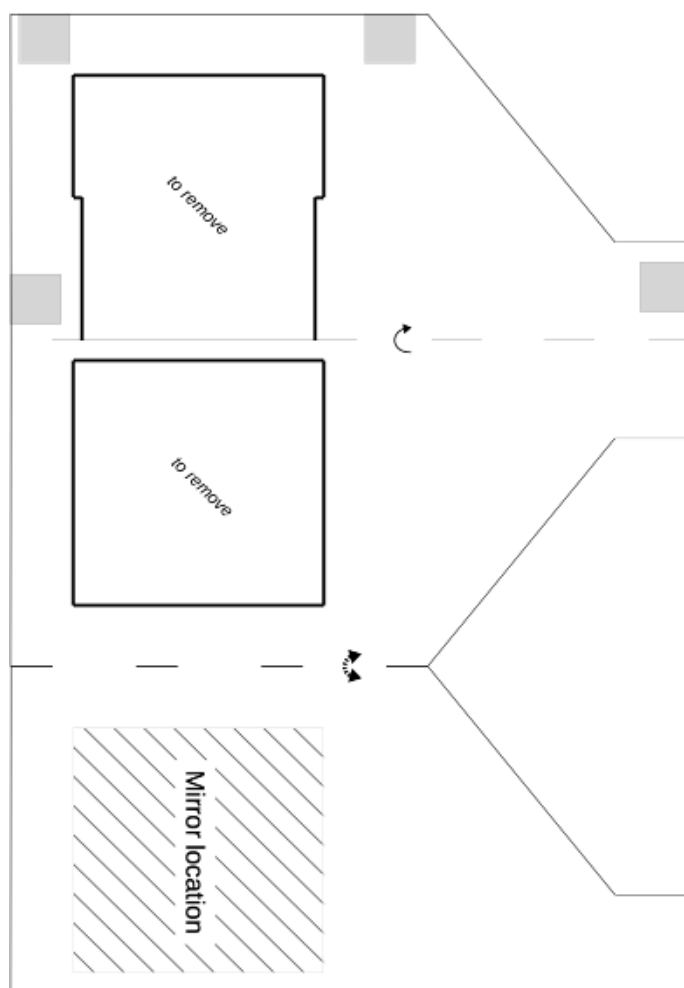
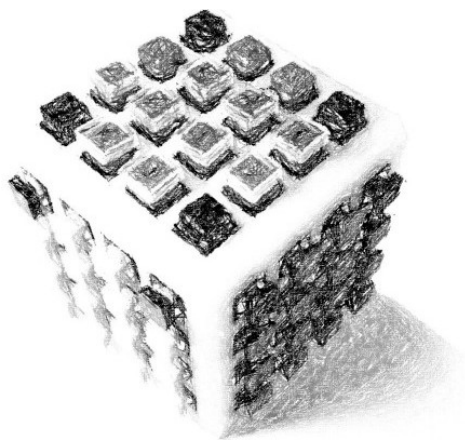


Figure A.4: Plan de la structure optionnelle (support du miroir) du *CARTON* à imprimer sur une feuille de format A4 ou Lettre.

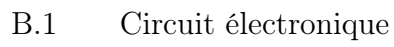
APPENDICE B

KEYCUBE



Cette annexe présente un tableau et plusieurs figures liées au keycube n'ayant pas vocation à être détaillés, ceci inclut :

- Circuit électronique
- Vue en éclaté
- Accessibilité des touches par doigt
- Phrases utilisées pour l'analyse de l'usage des doigts



B.2 Vue en éclaté

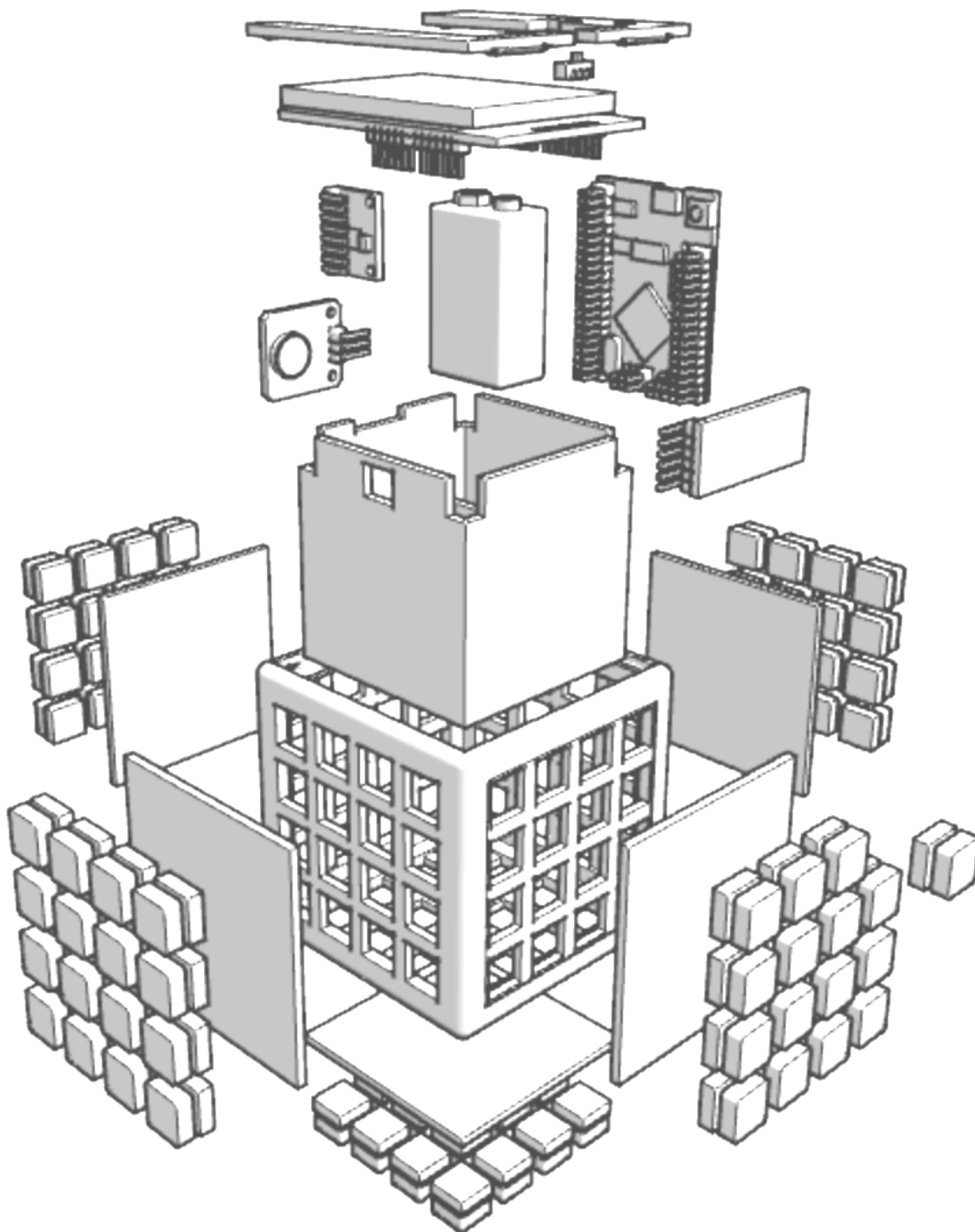


Figure B.2: Vue en éclaté des composants principaux du keycube.

B.3 Accessibilité des touches par doigt

B.4 Phrases utilisées pour l'analyse de l'usage des doigts

Index	Phrase	Nombre de caractères
0	the quick brown fox jumps over a lazy dog	41
1	video camera with a zoom lens	29
2	these cookies are so amazing	28
3	frequently asked questions	26
4	wear a crown with many jewels	29
5	the kids are very excited	25
6	the quick brown fox jumped	26
7	my favorite subject is psychology	33
8	this is a non profit organization	33
9	our fax number has changed	26
10	hands on experience with a job	30
11	valium in the economy size	26
12	traveling requires a lot of fuel	32

Tableau B.1: Phrase d'entraînement (pangramme, index 0) et phrases utilisés pour l'analyse de l'usage des doigts provenant d'un ensemble de phrases facilement mémorables et représentatives de la langue anglaise (MacKenzie et Soukoreff, 2003). Tous les caractères sont présentés au minimum 4 fois.

APPENDICE C

QUESTIONNAIRES STANDARDISÉS

Cette annexe présente l'ensemble des questionnaires standardisés utilisés lors des études utilisateurs :

- System Usability Scale (SUS). Ce questionnaire inclut une échelle de Likert avec 10 questions pour mesurer rapidement l'utilisabilité (telle que la fonctionnalité, l'efficacité et la satisfaction) d'un produit. Les réponses aux questions permettent notamment de calculer un score final variant sur une échelle entre 0 (mauvais) et 100 (bon).
- NASA Task Load index (NASA-TLX). Cet outil permet d'évaluer la charge de travail subjective de l'utilisateur induite par un produit. Une première partie inclut 6 questions pour évaluer l'amplitude (entre 0 et 20) de charge de plusieurs dimensions, puis une deuxième partie (optionnelle) permet de pondérer les dimensions par paire. Les réponses aux questions permettent de calculer un index variant entre 0 (bon) et 120 (mauvais).
- AttrakDiff. Ce questionnaire inclut 36 questions (10 dans sa version simplifiée) sous forme de différenciateurs sémantiques pour mesurer l'expérience utilisateur, faisant notamment ressortir 4 sous-échelles telles que les qualités hédoniques, pragmatiques et l'attractivité. Les scores rapportés varient entre -3 (mauvais) et 3 (bon).

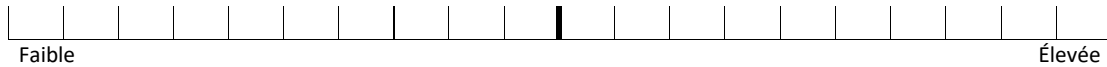
C.1 System Usability Scale

#	Questions	Pas du tout d'accord			Tout à fait d'accord	
		1	2	3	4	5
1	Je pense que j'aimerais utiliser ce système fréquemment.					
2	J'ai trouvé ce système inutilement complexe.					
3	J'ai trouvé ce système facile à utiliser.					
4	Je pense que j'aurais besoin d'un support technique pour être capable d'utiliser ce système.					
5	J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce système étaient bien intégrées.					
6	J'ai trouvé qu'il y avait trop d'incohérence dans ce système.					
7	Je suppose que la plupart des gens apprendraient très rapidement à utiliser ce système.					
8	J'ai trouvé ce système très contraignant à utiliser.					
9	Je me suis senti(e) très confiant(e) en utilisant ce système.					
10	J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de me sentir familiarisé(e) avec ce système.					

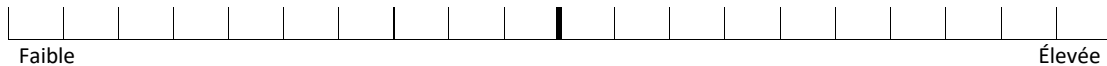
C.2 NASA Task Load index (TLX)

Exigence mentale

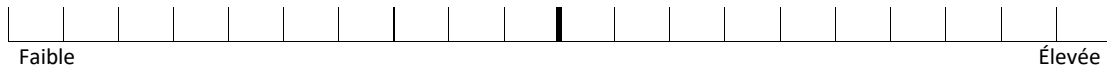
À quel point la tâche était-elle mentalement exigeante ?

**Exigence physique**

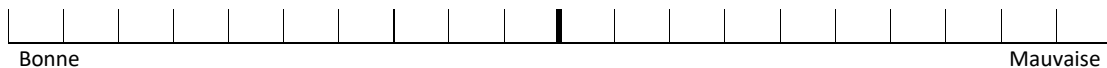
À quel point la tâche était-elle physiquement exigeante ?

**Exigence temporelle**

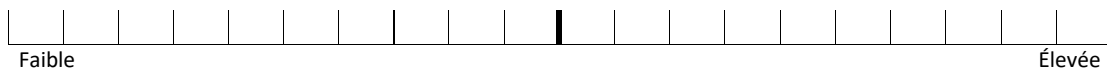
À quel point le rythme de la tâche était-il pressé ou précipité ?

**Performance**

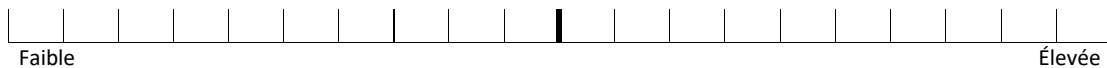
Dans quelle mesure avez-vous réussi à atteindre l'objectif de la tâche ?

**Effort**

Quel degré d'effort avez-vous dû fournir (mentalement et physiquement) pour atteindre votre niveau de performance ?

**Frustration**

À quel point étiez-vous en danger, découragé, irrité, stressé et agacé ?



C.3 AttrakDiff (version allégée)

Qualité Pragmatique (QP)

[illegible]

Qualité Hédonique – Stimulation (QHS)

[illegible]

Qualité Hédonique – Identité (QHI)

[illegible]

Attractivité Globale (ATT)

[illegible]

APPENDICE D

QUESTIONNAIRES PERSONNALISÉS

Cette annexe présente les questionnaires personnalisés (de tailles réduites, dépourvus d'espaces) utilisés lors des études utilisateurs, le plus souvent administrés au début ou à la fin des études pour récolter des informations sur la démographie et l'expérience des participants, mais aussi des commentaires généraux sur les interfaces présentées et le caractère de l'étude ou encore pour adresser quelques questions spécifiques.

D.1 Étude utilisateurs préliminaire ControlWear

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Quelle est votre profession ?

4. Est-ce que vous utilisez un téléphone intelligent ?

☐ Jamais ☐ Oui, quelques fois ☐ Oui, tous les jours

5. Connaissiez-vous le geste du « glissement » avant l'expérience ?

☐ Oui ☐ Non

6. Est-ce que vous utilisez un assistant vocal (Siri, Cortana...) ?

☐ Je ne connais pas ☐ Jamais ☐ Rarement ☐ Couramment

7. Est-ce que vous utilisez une montre connectée (Apple Watch, Android Wear...) ?

☐ Je ne connais pas ☐ Jamais ☐ Rarement ☐ Couramment

8. Est-ce que vous utilisez des lunettes/casques de réalité augmentée ?

☐ Je ne connais pas ☐ Jamais ☐ Rarement ☐ Couramment

9. Veuillez noter ces différentes caractéristiques d'interaction.

Caractéristique	Interface	(mauvais)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 (bon)
Intuitivité, facilité	Tête		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Tactile		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Montre		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Appréciation, plaisir	Tête		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Tactile		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Montre		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10. Quelle interface avez-vous préférée ? Veuillez les classer par ordre de préférence.

	(celle que vous préférez le plus)	1	2	3	(celle que vous préférez le moins)
Tête		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Tactile		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Montre		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

11. Pourquoi avez-vous choisi cet ordre ?

12. Outre votre appréciation, quelle interface vous a semblé plus facile d'utilisation, plus naturelle ? (Elle peut être différente ou semblable à votre préférée.)

13. Avez-vous rencontré des problèmes ou difficultés d'utilisation avec une des interfaces ? La(les)quelle(s) ?

14. Avez-vous des remarques générales sur l'usage du CARTON ?

15. Avez-vous des remarques générales sur l'usage de ControlWear (la montre connectée) ?

16. Avez-vous des remarques générales sur l'étude en elle-même ?

D.2 Étude utilisateurs ControlWear : *in situ*

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Depuis combien de temps effectuez-vous votre métier ?

4. Quelle interface avez-vous préférée ? Veuillez les classer par ordre de préférence.

	(celle que vous préférez le plus)	1	2	3	4	(celle que vous préférez le moins)
Tablette		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Visiocasque		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Montre		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Mixte		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

5. Pourquoi avez-vous choisi cet ordre ?

6. Avez-vous des remarques générales sur l'usage de ControlWear (la montre connectée) ou sur l'étude en elle-même ?

D.3 Étude utilisateurs ControlWear : contrôlée

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Quelle est votre préférence manuelle ?

☐ Gauche ☐ Droite

4. Portez-vous un correcteur visuel (paire de lunettes ou lentilles) ?

☐ Oui ☐ Non

5. Veuillez noter ces différentes compétences.

	Novice	1	2	3	4	5	Expert(e)
Langue anglaise (lecture, écriture, communication orale)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Visiocasque de réalité augmentée (manipulation)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Montre connectée (manipulation)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

6. Pour chaque situation, veuillez inscrire votre interface préférée.

	Visiocasque	Montre	Mixte
Debout	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Couché	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Espace restreint	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mains occupées	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

7. Avez-vous des remarques générales sur l'usage de ControlWear (la montre connectée) ou l'étude en elle-même ?

D.4 Étude utilisateurs keycube 1 : saisie de l'appareil

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Exercez-vous une activité (professionnelle ou personnelle) nécessitant une dextérité particulière de vos doigts ? Si oui, veuillez préciser.

4. Fréquence d'utilisation

	Jamais	Ponctuel	1 fois par mois	2 à 3 fois par mois	1 fois par semaine	2 à 3 fois par semaine	1 fois par jour	Plusieurs fois par jour
Clavier traditionnel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manette de jeux vidéo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rubik's cube	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Regardez-vous le clavier lorsque vous écrivez ?

☐ Non (très rarement ou jamais) ☐ Seulement les caractères spéciaux ☐ Oui (très souvent ou toujours)

6. Mesures (en mm)

	Gauche	Droite
Circonférence (là où les doigts rencontrent la paume)		
Longueur (entre le haut du majeur et la base de la paume)		
Largeur/écart (entre le pouce et l'auriculaire, main ouverte)		

7. Veuillez classer par ordre d'importance l'ensemble des caractéristiques suivantes

(Caractéristiques aléatoirement présentées)	(plus important)	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (moins important)
Confort général (sensation musculaire)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilité à tourner l'appareil (rotation)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilité à faire des combinaisons de touches		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilité à utiliser la surface tactile		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilité à secouer		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilité à déposer		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nombre de touches directement accessibles		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nombre de doigts impliqués (apte à être utilisés)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nombre de touches apparentes		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

8. Considérez-vous d'autres variables suivant les positions de vos mains et de l'appareil ? Si oui, veuillez préciser.

9. Considérez-vous d'autres positions ou activités influant sur les caractéristiques d'utilisation de l'appareil ? Si oui, veuillez préciser.

10. Pourquoi avoir choisi ces positions de tenu de l'appareil (debout et assis) ?

11. Si vous devez améliorer l'appareil, que feriez-vous et pourquoi ?

12. Avez-vous d'autres remarques (sur l'étude) ?

D.5 Étude utilisateurs keycube 2 : accessibilité et préférence

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Exercez-vous une activité (professionnelle ou personnelle) nécessitant une dextérité particulière de vos doigts ? Si oui, veuillez préciser.

4. Fréquence d'utilisation

	Jamais	Ponctuel	1 fois par mois	2 à 3 fois par mois	1 fois par semaine	2 à 3 fois par semaine	1 fois par jour	Plusieurs fois par jour
Clavier traditionnel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manette de jeux vidéo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rubik's cube	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Regardez-vous le clavier lorsque vous écrivez ?

☐ Non (très rarement ou jamais) ☐ Seulement les caractères spéciaux ☐ Oui (très souvent ou toujours)

6. Préférence manuelle ?

☐ Gaucher ☐ Droitier ☐ Ambidextre

7. Mesures (en mm)

Main	Gauche	Droite
Circonférence (là où les doigts rencontrent la paume)		
Longueur (entre le haut du majeur et la base de la paume)		
Largeur/écart (entre le pouce et l'auriculaire, main ouverte)		

8. Accessibilité

Cette question est reproduite 10 fois, pour chacun des doigts, un à un (l'ordre a été contrebalancé).

Code de touche (80 au total)	Sans effort (léger mouvement des doigts)	Avec effort (léger mouvement des mains ou de l'appareil)	Impossible
R1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... (x 78)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Y16	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

9. Préférence

Code de touche (80 au total) (présenté aléatoirement)	Pouce		Index		Majeur		Annulaire		Auriculaire	
	G(auche)	D(roite)	G	D	G	D	G	D	G	D
R1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... (x 78)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Y16	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10. Où disposeriez-vous les lettres de l'alphabet (brève description) ?

11. Où disposeriez-vous les chiffres (brève description) ?

12. Où disposeriez-vous les caractères spéciaux et marquages tactiles ?

Code de touche (80 au total)	Retour arrière	Entrée	Espace	Majuscule	Contrôle	Alternative	Commande (ou touche Windows)	Marquage tactile
R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... (x 78)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Y16	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

13. Si vous devez améliorer l'appareil, que feriez-vous et pourquoi ?

14. Avez-vous d'autres remarques (sur l'étude...) ?

D.6 Étude utilisateurs keycube 3 : transfert et apprentissage

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Exercez-vous une activité (professionnelle ou personnelle) nécessitant une dextérité particulière de vos doigts ? Si oui, veuillez préciser.

4. Fréquence d'utilisation

	Jamais	Ponctuel	1 fois par mois	2 à 3 fois par mois	1 fois par semaine	2 à 3 fois par semaine	1 fois par jour	Plusieurs fois par jour
Clavier traditionnel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manette de jeux vidéo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rubik's cube	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Regardez-vous le clavier lorsque vous écrivez ?

☐ Non (très rarement ou jamais) ☐ Seulement les caractères spéciaux ☐ Oui (très souvent ou toujours)

6. Quelle est votre disposition de caractères habituelle ?

☐ QWERTY ☐ AZERTY

7. Connaissez-vous la disposition de caractères Dvorak ?

☐ Oui ☐ Non

8. Préférence manuelle

☐ Gauche ☐ Droitier ☐ Ambidextre

9. Mesures (en mm)

Main	Gauche	Droite
Circonférence (là où les doigts rencontrent la paume)		
Longueur (entre le haut du majeur et la base de la paume)		
Largeur/écart (entre le pouce et l'auriculaire, main ouverte)		

10. Si vous devez améliorer l'appareil, que feriez-vous et pourquoi ?

11. Avez-vous d'autres remarques (sur l'étude) ?

D.7 Étude utilisateurs keycube 4 : réalité augmentée et usage des doigts

1. Quel est votre genre ?

☐ Femme ☐ Homme

2. Quelle est votre date de naissance ?

3. Exercez-vous une activité (professionnelle ou personnelle) nécessitant une dextérité particulière de vos doigts ? Si oui, veuillez préciser.

4. Fréquence d'utilisation

	Jamais	Ponctuel	1 fois par mois	2 à 3 fois par mois	1 fois par semaine	2 à 3 fois par semaine	1 fois par jour	Plusieurs fois par jour
Clavier traditionnel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manette de jeux vidéo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Rubik's cube	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Téléphone intelligent	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Regardez-vous le clavier lorsque vous écrivez ?

☐ Non (très rarement ou jamais) ☐ Seulement les caractères spéciaux ☐ Oui (très souvent ou toujours)

6. Quelle fonctionnalité de saisie de texte utilisez-vous avec le téléphone intelligent ?

☐ Auto-correction ☐ Suggestion de mots ☐ Saisie de mot par gestuelle

7. Préférence manuelle ?

☐ Gaucher ☐ Droitier ☐ Ambidextre

8. Mesures (en mm)

Main	Gauche	Droite
Circonférence (là où les doigts rencontrent la paume)		
Longueur (entre le haut du majeur et la base de la paume)		
Largeur/écart (entre le pouce et l'auriculaire, main ouverte)		

9. Si vous devez améliorer l'appareil, que feriez-vous et pourquoi ?

10. Avez-vous d'autres remarques (sur l'étude) ?

RÉFÉRENCES

- Ahn, S., Heo, S. et Lee, G. (2017). Typing on a Smartwatch for Smart Glasses. Dans *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '17, 201–209., New York, NY, USA. ACM. event-place : Brighton, United Kingdom, <http://dx.doi.org/10.1145/3132272.3134136>
- Ahn, S. et Lee, G. (2019). Gaze-Assisted Typing for Smart Glasses. Dans *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, 857–869., New York, NY, USA. ACM. event-place : New Orleans, LA, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/3332165.3347883>
- Alonso, M. B. et Keyson, D. V. (2005). MusicCube : Making Digital Music Tangible. Dans *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '05, 1176–1179., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/1056808.1056870>
- Amma, C., Georgi, M., Lenz, T. et Winnen, F. (2016). Kinemic wave : A mobile freehand gesture and text-entry system. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3639–3642.
- Amma, C., Georgi, M. et Schultz, T. (2012). Airwriting : Hands-free mobile text input by spotting and continuous recognition of 3D-space handwriting with inertial sensors. Dans *2012 16th International Symposium on Wearable Computers*, 52–59. IEEE.
- Arif, A. S. et Stuerzlinger, W. (2009). Analysis of text entry performance metrics. Dans *2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity*, 100–105. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/TIC-STH.2009.5444533>
- Assila, A., Káthia, M. d. O. et Ezzedine, H. (2016). Standardized usability questionnaires : Features and quality focus. *Electronic Journal of Computer Science and Information Technology : eJCIST*, 6(1). Publisher : Electronic Journal of Computer Science and Information Technology (eJCSIT).

- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, 6(4), 355–385.
- Bangor, A., Kortum, P. et Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean : Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies*, 4(3), 114–123.
- Belkacem, I., Pecci, I., Martin, B. et Faiola, A. (2019). TEXTile : Eyes-Free Text Input on Smart Glasses Using Touch Enabled Textile on the Forearm. Dans D. Lamas, F. Loizides, L. Nacke, H. Petrie, M. Winckler, et P. Zaphiris (dir.). *Human-Computer Interaction – INTERACT 2019*, Lecture Notes in Computer Science, 351–371., Cham. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-29384-0_22
- Block, F., Schmidt, A., Villar, N. et Gellersen, H. W. (2004). Towards a playful user interface for home entertainment systems. Dans *European Symposium on Ambient Intelligence*, 207–217. Springer.
- Boletsis, C. et Kongsvik, S. (2019). Controller-based Text-input Techniques for Virtual Reality : An Empirical Comparison. *International Journal of Virtual Reality*, 19(3), 2–15. <http://dx.doi.org/10.20870/IJVR.2019.19.3.2917>
- Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human kinetics. Récupéré le 2017-12-05 de <https://psycnet.apa.org/record/1998-07179-000>
- Bottani, E. et Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry : A review of the last decade. *IIEE Transactions*, 51(3), 284–310. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>, <http://dx.doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
- Boustila, S., Guégan, T., Takashima, K. et Kitamura, Y. (2019). Text Typing in VR Using Smartphones Touchscreen and HMD. Dans *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 860–861. ISSN : 2642-5246, <http://dx.doi.org/10.1109/VR.2019.8798238>
- Bovet, S., Kehoe, A., Crowley, K., Curran, N., Gutierrez, M., Meisser, M., Sullivan, D. O. et Rouvinez, T. (2018). Using traditional keyboards in VR : SteamVR developer kit and pilot game user study. Dans *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM)*, 1–9. IEEE.
- Bowman, D. A., Ly, V. Q. et Campbell, J. M. (2001). *Pinch keyboard : Natural text input for immersive virtual environments*. Rapport technique TR-01-15, Virginia Tech.

- Bowman, D. A., Rhoton, C. J. et Pinho, M. S. (2002). Text input techniques for immersive virtual environments : An empirical comparison. Dans *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 46, 2154–2158. SAGE Publications Sage CA. <http://dx.doi.org/10.1177/154193120204602611>
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194), 4–7.
- Brun, D., Ferreira, S. M., Gouin-Vallerand, C. et George, S. (2016). CARTON Project : Do-It-Yourself Approach to Turn a Smartphone into a Smart Eyewear. Dans *Proceedings of the 14th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multi Media*, MoMM '16, 128–136., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3007120.3007134>
- Brun, D., Ferreira, S. M., Gouin-Vallerand, C. et George, S. (2017). A Mobile Platform for Controlling and Interacting with a Do-It-Yourself Smart Eyewear. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 13(1), 41–61.
- Brun, D., George, S. et Gouin-Vallerand, C. (2020). Keycube : Text Entry Evaluation with a Cubic Device. Dans *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, 1–9., Honolulu, HI, USA. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/3334480.3382837>
- Brun, D., Gouin-Vallerand, C. et George, S. (2019). Keycube is a Kind of Keyboard (K3). Dans *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, INT034 :1–INT034 :4., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3290607.3313258>
- Brun, D., Ruer, P., Gouin-Vallerand, C. et George, S. (2018). A Toolkit for Exploring Augmented Reality through Construction with Children. Dans *2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 106–113. <http://dx.doi.org/10.1109/SVR.2018.00026>
- Buzing, P. (2003). Comparing different keyboard layouts : aspects of qwerty, dvorak and alphabetical keyboards. *Delft University of Technology Articles*.
- Camarata, K., Do, E. Y.-L., Johnson, B. R. et Gross, M. D. (2002). Navigational blocks : navigating information space with tangible media. Dans *Proceedings of the 7th international conference on Intelligent user interfaces*, 31–38. ACM.
- Castellucci, S. J. et MacKenzie, I. S. (2008). Graffiti vs. unistrokes : an empirical comparison. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors*

- in Computing Systems*, 305–308. ACM.
- Cha, J.-M., Choi, E. et Lim, J. (2015). Virtual Sliding QWERTY : A new text entry method for smartwatches using Tap-N-Drag. *Applied ergonomics*, 51, 263–272. Publisher : Elsevier.
- Chakraborty, A., Gross, R., McIntee, S., Hong, K. W., Lee, J. Y. et St. Amant, R. (2014). CAPTIVE : A Cube with Augmented Physical Tools. Dans *Proceedings of the Extended Abstracts of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, 1315–1320., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2559206.2581340>
- Chang, M.-W., Chiueh, T.-c. et Chang, C.-M. (2014). Virtual keyboard for head mounted display-based wearable devices. Dans *2014 20th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, 225–232. IEEE.
- Chen, S., Wang, J., Guerra, S., Mittal, N. et Prakkamakul, S. (2019). Exploring Word-gesture Text Entry Techniques in Virtual Reality. Dans *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–6.
- Chen, X., Grossman, T. et Fitzmaurice, G. (2014). Swipeboard : a text entry technique for ultra-small interfaces that supports novice to expert transitions. Dans *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 615–620.
- Cho, H., Kim, M. et Seo, K. (2014). A Text Entry Technique for Wrist-worn Watches with Tiny Touchscreens. Dans *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST'14 Adjunct, 79–80., New York, NY, USA. ACM. event-place : Honolulu, Hawaii, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/2658779.2658785>
- Clarkson, E., Clawson, J., Lyons, K. et Starner, T. (2005). An empirical study of typing rates on mini-QWERTY keyboards. Dans *CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, 1288–1291. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/1056808.1056898>
- Darbar, R., Dash, P. et Samanta, D. (2016a). ETAO keyboard : Text input technique on smartwatches. *Procedia Computer Science*, 84, 137–141. Publisher : Elsevier.
- Darbar, R., Sen, P. K., Dash, P. et Samanta, D. (2016b). Using hall effect sensors for 3D space text entry on smartwatches. *Procedia computer science*, 84, 79–85. Publisher : Elsevier.

- David, P. A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *The American economic review*, 75(2), 332–337.
- de la Rivière, J.-B., Kervégant, C., Orvain, E. et Dittlo, N. (2008). CubTile : A Multi-touch Cubic Interface. Dans *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '08, 69–72., New York, NY, USA. ACM. event-place : Bordeaux, France, <http://dx.doi.org/10.1145/1450579.1450593>
- Derby, J. L., Rarick, C. T. et Chaparro, B. S. (2019). Text Input Performance with a Mixed Reality Head-Mounted Display (HMD). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 1476–1480. <http://dx.doi.org/10.1177/1071181319631279>
- Dhakal, V., Feit, A. M., Kristensson, P. O. et Oulasvirta, A. (2018). Observations on typing from 136 million keystrokes. Dans *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12.
- Dudley, J. J., Vertanen, K. et Kristensson, P. O. (2018). Fast and Precise Touch-Based Text Entry for Head-Mounted Augmented Reality with Variable Occlusion. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 25(6), 30 :1–30 :40. <http://dx.doi.org/10.1145/3232163>
- Dunlop, M. D., Roper, M. et Imperatore, G. (2017). Text Entry Tap Accuracy and Exploration of Tilt Controlled Layered Interaction on Smartwatches. Dans *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, 23 :1–23 :11., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3098279.3098560>. Récupéré le 2018-06-04 de <http://doi.acm.org/10.1145/3098279.3098560>
- Elmgren, R. (2017). *Handwriting in VR as a Text Input Method*. (Master's Thesis in Human-Computer Interaction). KTH Royal Institute of Technology. Récupéré le 2019-12-22 de <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-208646>
- Fashimpaur, J., Kin, K. et Longest, M. (2020). PinchType : Text Entry for Virtual and Augmented Reality Using Comfortable Thumb to Fingertip Pinches. Dans *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, 1–7., Honolulu, HI, USA. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/3334480.3382888>
- Feit, A. M., Weir, D. et Oulasvirta, A. (2016). How we type : Movement strategies and performance in everyday typing. Dans *Proceedings of the 2016 chi conference on human factors in computing systems*, 4262–4273. ACM.

- Fink, C. (2017). The Inevitability Of Augmented Reality HMDs. Récupéré le 2017-12-11 de <https://www.forbes.com/sites/charlifink/2017/11/13/the-inevitability-of-augmented-reality-hmds/#5b1ce3a642f8>
- Fleetwood, M. D., Byrne, M. D., Centgraf, P., Dudziak, K., Lin, B. et Mogilev, D. (2002). An evaluation of text-entry in Palm OS–Graffiti and the virtual keyboard. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 46, 617–621. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA.
- Fleishman, E. A. et Rich, S. (1963). Role of kinesthetic and spatial-visual abilities in perceptual-motor learning. *Journal of Experimental Psychology*, 66(1), 6.
- Fröhlich, B. et Plate, J. (2000). The Cubic Mouse : A New Device for Three-dimensional Input. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, 526–531., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/332040.332491>
- Fujiwara, K. (2016). Error Correction of Speech Recognition by Custom Phonetic Alphabet Input for Ultra-Small Devices. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, 104–109., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2851581.2890380>
- Fukumoto, M. et Suenaga, Y. (1994). “FingerRing” : A Full-time Wearable Interface. Dans *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*, CHI '94, 81–82., New York, NY, USA. ACM. event-place : Boston, Massachusetts, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/259963.260056>
- Fukumoto, M. et Tonomura, Y. (1997). “Body Coupled FingerRing” : Wireless Wearable Keyboard. Dans *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, 147–154., New York, NY, USA. ACM. event-place : Atlanta, Georgia, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/258549.258636>
- Funk, M., Sahami, A., Henze, N. et Schmidt, A. (2014). Using a touch-sensitive wristband for text entry on smart watches. Dans *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, 2305–2310., Toronto, Ontario, Canada. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/2559206.2581143>
- Ghosh, D., Foong, P. S., Zhao, S., Liu, C., Janaka, N. et Erusu, V. (2020). EYE-editor : Towards On-the-Go Heads-Up Text Editing Using Voice and Manual Input. Dans *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, 1–13., Honolulu, HI, USA. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/3313831.3376173>

- Goh, W. B., Kasun, L. L., Tan, J. et Shou, W. (2012). The i-Cube : design considerations for block-based digital manipulatives and their applications. Dans *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*, 398–407. ACM.
- Goldberg, D. et Richardson, C. (1993). Touch-typing with a Stylus. Dans *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '93, 80–87., New York, NY, USA. ACM. event-place : Amsterdam, The Netherlands, <http://dx.doi.org/10.1145/169059.169093>. Récupéré le 2019-06-04 de <http://doi.acm.org/10.1145/169059.169093>
- Gong, J., Xu, Z., Guo, Q., Seyed, T., Chen, X. A., Bi, X. et Yang, X.-D. (2018). WrisText : One-handed Text Entry on Smartwatch Using Wrist Gestures. Dans *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, 181 :1–181 :14., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3173755>
- González, G., Molina, J. P., García, A. S., Martínez, D. et González, P. (2009). Evaluation of text input techniques in immersive virtual environments. In *New Trends on Human-Computer Interaction* 109–118. Springer.
- Gordon, M., Ouyang, T. et Zhai, S. (2016). WatchWriter : Tap and Gesture Typing on a Smartwatch Miniature Keyboard with Statistical Decoding. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, 3817–3821., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2858036.2858242>
- Grossman, T., Chen, X. A. et Fitzmaurice, G. (2015). Typing on glasses : adapting text entry to smart eyewear. Dans *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, 144–152. ACM.
- Grubert, J., Witzani, L., Ofek, E., Pahud, M., Kranz, M. et Kristensson, P. O. (2018a). Effects of hand representations for typing in virtual reality. Dans *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 151–158. IEEE.
- Grubert, J., Witzani, L., Ofek, E., Pahud, M., Kranz, M. et Kristensson, P. O. (2018b). Text entry in immersive head-mounted display-based virtual reality using standard keyboards. Dans *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 159–166. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/VR.2018.8446059>
- Gugenheimer, J., Dobbstein, D., Winkler, C., Haas, G. et Rukzio, E. (2016). Facetouch : Enabling touch interaction in display fixed uis for mobile virtual

- reality. Dans *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 49–60. ACM.
- Gupta, A. et Balakrishnan, R. (2016). DualKey : Miniature Screen Text Entry via Finger Identification. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, 59–70., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2858036.2858052>
- Gupta, A., Ji, C., Yeo, H.-S., Quigley, A. et Vogel, D. (2019). RotoSwype : Word-Gesture Typing Using a Ring. Dans *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, 14 :1–14 :12., New York, NY, USA. ACM. event-place : Glasgow, Scotland Uk, <http://dx.doi.org/10.1145/3290605.3300244>
- Götzelmann, T. et Vázquez, P.-P. (2015). InclineType : An Accelerometer-based Typing Approach for Smartwatches. Dans *Proceedings of the XVI International Conference on Human Computer Interaction*, Interacción '15, 59 :1–59 :4., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2829875.2829929>
- Hansberger, J. T., Peng, C., Mathis, S. L., Shanthakumar, V. A., Meacham, S. C., Cao, L. et Blakely, V. R. (2017). Dispelling the Gorilla Arm Syndrome : The Viability of Prolonged Gesture Interactions. Dans *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*, 505–520. Springer.
- Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX) ; 20 years later. Dans *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 50, 904–908. Sage publications Sage CA : Los Angeles, CA.
- Hart, S. G. et Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139–183.
- Hassenzahl, M., Burmester, M. et Koller, F. (2003). AttrakDiff : Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In *Mensch & computer 2003* 187–196. Springer.
- Honan, M., Serina, E., Tal, R. et Rempel, D. (1995). Wrist postures while typing on a standard and split keyboard. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society annual meeting*, volume 39, 366–368. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA. Issue : 5.
- Hong, J., Heo, S., Isokoski, P. et Lee, G. (2015). SplitBoard : A simple split soft keyboard for wristwatch-sized touch screens. Dans *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1233–1236.

- Hoppe, A. H., Otto, L., van de Camp, F., Stiefelhagen, R. et Unmüßig, G. (2018). qVRty : Virtual Keyboard with a Haptic, Real-World Representation. Dans C. Stephanidis (dir.). *HCI International 2018 – Posters' Extended Abstracts*, Communications in Computer and Information Science, 266–272., Cham. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-92279-9_36
- Hsieh, Y.-T., Jylhä, A., Orso, V., Gamberini, L. et Jacucci, G. (2016). Designing a Willing-to-Use-in-Public Hand Gestural Interaction Technique for Smart Glasses. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, 4203–4215., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2858036.2858436>
- Hsiu, M.-C., Huang, D.-Y., Chen, C. A., Lin, Y.-C., Hung, Y.-p., Yang, D.-N. et Chen, M. (2016). ForceBoard : Using Force As Input Technique on Size-limited Soft Keyboard. Dans *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct*, MobileHCI '16, 599–604., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2957265.2961827>
- Ichida, H., Itoh, Y., Kitamura, Y. et Kishino, F. (2004). ActiveCube and its 3D Applications. Dans *IEEE VR*, 2–5.
- International Organization for Standardization (2008). Ergonomics of human-system interaction — Part 410 : Design criteria for physical input devices (ISO 9241-410). Récupéré le 2020-09-24 de <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/88/38899.html>
- International Organization for Standardization (2019). Ergonomics of human-system interaction — Part 210 : Human-centred design for interactive systems (ISO 9241-210). Récupéré le 2020-09-19 de <https://www.iso.org/standard/77520.html>
- Ishii, A., Adachi, T., Shima, K., Nakamae, S., Shizuki, B. et Takahashi, S. (2017). FistPointer : Target Selection Technique Using Mid-air Interaction for Mobile VR Environment. Dans *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, 474–474., New York, NY, USA. ACM. event-place : Denver, Colorado, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/3027063.3049795>
- Jacob, R. J. K. (1991). The use of eye movements in human-computer interaction techniques : what you look at is what you get. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 9(2), 152–169. <http://dx.doi.org/10.1145/123078>.

128728

- Jiang, H. et Weng, D. (2020). HiPad : Text entry for Head-Mounted Displays Using Circular Touchpad. Dans *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. <http://dx.doi.org/10.1109/VR46266.2020.00-12>
- Jiang, H., Weng, D., Zhang, Z., Bao, Y., Jia, Y. et Nie, M. (2018). HiKeyb : High-Efficiency Mixed Reality System for Text Entry. Dans *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 132–137. IEEE.
- Jiang, H., Weng, D., Zhang, Z. et Chen, F. (2019). HiFinger : One-Handed Text Entry Technique for Virtual Environments Based on Touches between Fingers. *Sensors*, 19(14), 3063.
- Jimenez, J. G. et Schulze, J. P. (2018). Continuous-Motion Text Input in Virtual Reality. *Electronic Imaging*, 2018(3), 450–1.
- Juan, C., Canu, R. et Giménez, M. (2008). Augmented Reality Interactive Storytelling Systems Using Tangible Cubes for Edutainment. Dans *2008 Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*, 233–235. ISSN : 2161-377X, <http://dx.doi.org/10.1109/ICALT.2008.122>
- Kay, N. M. (2013). Rerun the tape of history and QWERTY always wins. *Research Policy*, 42(6), 1175–1185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2013.03.007>
- Kim, H., Sohn, M., Kim, S., Pak, J. et Lee, W. (2007). Button keyboard : a very small keyboard with universal usability for wearable computing. Dans *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, 343–346. Springer.
- Kim, J., Delamare, W. et Irani, P. (2018a). ThumbText : Text Entry for Wearable Devices Using a Miniature Ring. Dans *Proceedings of Graphics Interface 2018, GI 2018*, p. 8., Toronto, Ontario. Canadian Human-Computer Communications Society / Société canadienne du dialogue humain-machine. <http://dx.doi.org/10.20380/GI2018.04>
- Kim, S., Ahn, S. et Lee, G. (2018b). DiaQwerty : QWERTY Variants to Better Utilize the Screen Area of a Round or Square Smartwatch. Dans *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '18*, 147–153., Tokyo, Japan. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/3279778.3279792>
- Kim, S., Kim, S., Kim, S. et Kim, G. J. (2004). Using Keyboards with Head Mounted Displays. Dans *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH International*

- Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, VRCAI '04, 336–343., New York, NY, USA. ACM. event-place : Singapore, <http://dx.doi.org/10.1145/1044588.1044662>
- Kim, Y. R. et Kim, G. J. (2016). Hovr-type : Smartphone as a typing interface in vr using hovering. Dans *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, 333–334. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2993369.2996330>
- Klemmer, E. T. (1971). Keyboard entry. *Applied Ergonomics*, 2(1), 2–6. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870\(71\)90002-0](http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870(71)90002-0)
- Knierim, P., Kosch, T., Groschopp, J. et Schmidt, A. (2020). Opportunities and Challenges of Text Input in Portable Virtual Reality. Dans *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, 1–8., Honolulu, HI, USA. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/3334480.3382920>
- Knierim, P., Schwind, V., Feit, A. M., Nieuwenhuizen, F. et Henze, N. (2018). Physical Keyboards in Virtual Reality : Analysis of Typing Performance and Effects of Avatar Hands. Dans *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, 345 :1–345 :9., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3173919>
- Komninos, A. et Dunlop, M. (2014). Using a smart watch as a input device for text. *IEEE Pervasive Computing*, 13(4), 50–58. Publisher : IEEE.
- Kortum, P. et Bangor, A. (2013). Usability Ratings for Everyday Products Measured With the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 29(2), 67–76. <http://dx.doi.org/10.1080/10447318.2012.681221>
- Kristensson, P. O. (2015). Next-generation text entry. *Computer*, 48(7), 84–87.
- Kuester, F., Chen, M., Phair, M. E. et Mehring, C. (2005). Towards Keyboard Independent Touch Typing in VR. Dans *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '05, 86–95., New York, NY, USA. ACM. event-place : Monterey, CA, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/1101616.1101635>
- Kwon, J.-H., Lee, Y.-H., Kim, Y.-U., Choi, E.-S., Kwon, H.-M., Noh, G.-S., Lee, E.-M., Nam, S.-H., Lee, J.-J. et You, B.-J. (2016). Be Closer As You Being There : HMD-based Social Interaction System. Dans *SIGGRAPH ASIA 2016 VR Showcase*, SA '16, 2 :1–2 :2., New York, NY, USA. ACM. event-place : Macau, <http://dx.doi.org/10.1145/2996376.2996389>

- Lachnit, H. et Pieper, W. (1990). Speed and accuracy effects of fingers and dexterity in 5-choice reaction tasks. *Ergonomics*, 33(12), 1443–1454. Publisher : Taylor & Francis.
- Lallemand, C., Koenig, V., Gronier, G. et Martin, R. (2015). Création et validation d’une version française du questionnaire AttrakDiff pour l’évaluation de l’expérience utilisateur des systèmes interactifs. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology*, 65(5), 239–252.
- LaLomia, M. (1994). User acceptance of handwritten recognition accuracy. Dans *Conference companion on Human factors in computing systems*, 107–108.
- Langner, R., Augsburg, A. et Dachsel, R. (2014). CubeQuery : Tangible Interface for Creating and Manipulating Database Queries. Dans *Proceedings of the Ninth ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS ’14, 423–426., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2669485.2669526>
- Lee, H. et Woo, W. (2010). Tangible Spin Cube for 3D Ring Menu in Real Space. Dans *CHI ’10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA ’10, 4147–4152., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/1753846.1754117>
- Lee, J., Lee, C. et Kim, G. J. (2017). Vouch : multimodal touch-and-voice input for smart watches under difficult operating conditions. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 11(3), 289–299. <http://dx.doi.org/10.1007/s12193-017-0246-y>
- Lee, K. (2012). Augmented Reality in Education and Training. *TechTrends*, 56(2), 13.
- Lee, L. H., Lam, K. Y., Li, T., Braud, T., Su, X. et Hui, P. (2019). Quadmetric Optimized Thumb-to-Finger Interaction for Force Assisted One-Handed Text Entry on Mobile Headsets. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 3(3), 94 :1–94 :27. <http://dx.doi.org/10.1145/3351252>
- Lee, M. et Woo, W. (2003). ARKB : 3D vision-based Augmented Reality Keyboard. *ICAT 2003*, 54–57. Récupéré le 2019-12-23 de <http://koasas.kaist.ac.kr/handle/10203/151641>
- Lee, Y. et Kim, G. J. (2017). Vitty : Virtual Touch Typing Interface with Added Finger Buttons. Dans S. Lackey et J. Chen (dir.). *Virtual, Augmented and Mixed Reality*, Lecture Notes in Computer Science, 111–119., Cham. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/>

978-3-319-57987-0_9

- Lefevre, K., Totzauer, S., Bischof, A., Kurze, A., Storz, M., Ullmann, L. et Berger, A. (2016). Loaded Dice : Exploring the Design Space of Connected Devices with Blind and Visually Impaired People. Dans *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '16, 31 :1–31 :10., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2971485.2971524>
- Leiva, L. A., Sahami, A., Catala, A., Henze, N. et Schmidt, A. (2015). Text Entry on Tiny QWERTY Soft Keyboards. Dans *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, 669–678., New York, NY, USA. ACM. event-place : Seoul, Republic of Korea, <http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702388>
- Lertsithichai, S. et Seegmiller, M. (2002). CUBIK : A Bi-directional Tangible Modeling Interface. Dans *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '02, 756–757., New York, NY, USA. ACM. event-place : Minneapolis, Minnesota, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/506443.506582>
- Li, F. C. Y., Guy, R. T., Yatani, K. et Truong, K. N. (2011). The 1line keyboard : a QWERTY layout in a single line. Dans *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 461–470. ACM.
- Liew, C. C. (2017). CUPA : Cube Pal for Developing Children's Emotional Intelligence and Parent-Child Relationship. Dans *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, 124–129., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3027063.3048423>
- Lin, J.-W., Han, P.-H., Lee, J.-Y., Chen, Y.-S., Chang, T.-W., Chen, K.-W. et Hung, Y.-P. (2017). Visualizing the Keyboard in Virtual Reality for Enhancing Immersive Experience. Dans *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, SIGGRAPH '17, 35 :1–35 :2., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3102163.3102175>
- Lin, X., Chen, Y., Chang, X.-W., Liu, X. et Wang, X. (2018). SHOW : Smart Handwriting on Watches. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 1(4), 151 :1–151 :23. <http://dx.doi.org/10.1145/3161412>
- Livingston, M. A., Rosenblum, L. J., Brown, D. G., Schmidt, G. S., Julier, S. J., Baillot, Y., Swan II, J. E., Ai, Z. et Maassel, P. (2011). Military applications of augmented reality. In *Handbook of augmented reality* 671–706. Springer.
- Lu, Y., Yu, C., Yi, X., Shi, Y. et Zhao, S. (2017). BlindType : Eyes-Free Text

- Entry on Handheld Touchpad by Leveraging Thumb's Muscle Memory. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 1(2), 18 :1–18 :24. <http://dx.doi.org/10.1145/3090083>
- Lyons, K., Starner, T., Plaisted, D., Fusia, J., Lyons, A., Drew, A. et Looney, E. W. (2004). Twiddler Typing : One-handed Chording Text Entry for Mobile Phones. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, 671–678., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/985692.985777>
- Ma, X., Yao, Z., Wang, Y., Pei, W. et Chen, H. (2018). Combining Brain-Computer Interface and Eye Tracking for High-Speed Text Entry in Virtual Reality. Dans *23rd International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '18, 263–267., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3172944.3172988>
- MacKenzie, I. S. et Soukoreff, R. W. (2002). A model of two-thumb text entry. Dans *Graphics Interface*, 117–124. <http://dx.doi.org/10.20380/GI2002.14>
- MacKenzie, I. S. et Soukoreff, R. W. (2003). Phrase Sets for Evaluating Text Entry Techniques. Dans *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '03, 754–755., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/765891.765971>
- MacKenzie, I. S. et Zhang, S. X. (1997). The immediate usability of Graffiti. Dans *Proceedings of Graphics Interface'97*.
- Madison, H., Pereira, A., Korshøj, M., Taylor, L., Barr, A. et Rempel, D. (2015). Mind the gap : The effect of keyboard key gap and pitch on typing speed, accuracy, and usability, part 3. *Human factors*, 57(7), 1188–1194.
- Matias, E., MacKenzie, I. S. et Buxton, W. (1993). Half-QWERTY : A one-handed keyboard facilitating skill transfer from QWERTY. Dans *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 88–94. Citeseer. <http://dx.doi.org/10.1145/169059.169097>
- Matias, E., MacKenzie, I. S. et Buxton, W. (1996). One-handed touch typing on a QWERTY keyboard. *Human-Computer Interaction*, 11(1), 1–27.
- Matsumoto, T., Horiguchi, D., Nakashima, S. et Okude, N. (2006). Z-agon : Mobile Multi-display Browser Cube. Dans *CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '06, 351–356., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/1125451.1125528>
- Matviienko, A., Horwege, S., Frick, L., Ressel, C. et Boll, S. (2016). CubeLendar :

- Design of a Tangible Interactive Event Awareness Cube. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, 2601–2608., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2851581.2892278>
- McCall, R., Martin, B., Popleteev, A., Louveton, N. et Engel, T. (2015). Text entry on smart glasses. Dans *Human System Interactions (HSI), 2015 8th International Conference on*, 195–200. IEEE.
- McGill, M., Boland, D., Murray-Smith, R. et Brewster, S. (2015). A dose of reality : Overcoming usability challenges in vr head-mounted displays. Dans *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2143–2152. ACM.
- Merrill, D., Kalanithi, J. et Maes, P. (2007). Siftables : towards sensor network user interfaces. Dans *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, 75–78.
- Merrill, D., Sun, E. et Kalanithi, J. (2012). Sifteo Cubes. Dans *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, 1015–1018., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2212776.2212374>
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. et Kishino, F. (1995). Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum. Dans *Telemanipulator and telepresence technologies*, volume 2351, 282–293. International Society for Optics and Photonics.
- Mottelson, A., Larsen, C., Lyderik, M., Strohmeier, P. et Knibbe, J. (2016). Invisiboard : Maximizing Display and Input Space with a Full Screen Text Entry Method for Smartwatches. Dans *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '16, 53–59., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2935334.2935360>
- Murakami, T. et Nakajima, N. (1994). Direct and intuitive input device for 3-D shape deformation. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 465–470. ACM.
- Muss, T. M. et Hedge, A. (1999). Effects of a vertical split-keyboard on posture, comfort and performance. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 43, 496–500. SAGE Publications Sage CA. <http://dx.doi.org/10.1177/154193129904300606>
- Nascimento, T. H., Soares, F. A. A. M. N., Irani, P. P., Oliveira, L. L. G. d. et Soares, A. d. S. (2017). Method for Text Entry in Smartwatches Using

- Continuous Gesture Recognition. Dans *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, volume 2, 549–554. ISSN : 0730-3157, <http://dx.doi.org/10.1109/COMPSAC.2017.168>
- Norman, D. A. et Fisher, D. (1982). Why Alphabetic Keyboards Are Not Easy to Use : Keyboard Layout Doesn't Much Matter. *Human Factors*, 24(5), 509–519. <http://dx.doi.org/10.1177/001872088202400502>
- Noyes, J. (1983a). Chord keyboards. *Applied Ergonomics*, 14(1), 55–59. [http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870\(83\)90221-1](http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870(83)90221-1)
- Noyes, J. (1983b). The QWERTY keyboard : A review. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18(3), 265–281.
- Ogitani, T., Arahori, Y., Shinyama, Y. et Gondow, K. (2018). Space Saving Text Input Method for Head Mounted Display with Virtual 12-key Keyboard. Dans *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 342–349. IEEE.
- Oh, H. et Gross, M. D. (2015). Cube-in : A Learning Kit for Physical Computing Basics. Dans *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, 383–386., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2677199.2680597>
- Olofsson, J. (2017). *Input and Display of Text for Virtual Reality Head-Mounted Displays and Hand-held Positionally Tracked Controllers*. (Bachelor's Level). Luleå University of Technology.
- Oney, S., Harrison, C., Ogan, A. et Wiese, J. (2013). ZoomBoard : a diminutive qwerty soft keyboard using iterative zooming for ultra-small devices. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2799–2802.
- Orlosky, J., Katzakis, N., Kiyokawa, K. et Takemura, H. (2012). Torso Keyboard : a wearable text entry device that can be used while sitting, standing or walking.
- Otte, A., Menzner, T., Gesslein, T., Gagel, P., Schneider, D. et Grubert, J. (2019). Towards Utilizing Touch-sensitive Physical Keyboards for Text Entry in Virtual Reality. Dans *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 1729–1732. ISSN : 2642-5246, <http://dx.doi.org/10.1109/VR.2019.8797740>
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R. et Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215–228.

- Pereira, A., Hsieh, C.-M., Laroche, C. et Rempel, D. (2014). The effect of keyboard key spacing on typing speed, error, usability, and biomechanics, Part 2 : Vertical spacing. *Human factors*, 56(4), 752–759.
- Pereira, A., Lee, D. L., Sadeeshkumar, H., Laroche, C., Odell, D. et Rempel, D. (2013). The effect of keyboard key spacing on typing speed, error, usability, and biomechanics : Part 1. *Human factors*, 55(3), 557–566.
- Pham, D.-M. et Stuerzlinger, W. (2019). HawKEY : Efficient and Versatile Text Entry for Virtual Reality. Dans *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, 21 :1–21 :11., New York, NY, USA. ACM. event-place : Parramatta, NSW, Australia, <http://dx.doi.org/10.1145/3359996.3364265>
- Pick, S., Puika, A. S. et Kuhlen, T. W. (2016). SWIFTER : Design and evaluation of a speech-based text input metaphor for immersive virtual environments. Dans *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 109–112. ISSN : null, <http://dx.doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460039>
- Pla, P. et Maes, P. (2012). Display Blocks : Cubic Displays for Multi-perspective Visualization. Dans *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, 2015–2020., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2212776.2223745>
- Poirier, F. et Belatar, M. (2007). UniGlyph : only one keystroke per character on a 4-button minimal keypad for key-based text entry. Dans *HCI International 2007*, Beijing.
- Poirier, F. et Belatar, M. (2015). UniWatch - Some Approaches Derived from UniGlyph to Allow Text Input on Tiny Devices Such as Connected Watches. Dans M. Kurosu (dir.). *Human-Computer Interaction : Interaction Technologies*, Lecture Notes in Computer Science, 554–562., Cham. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-20916-6_51
- Poirier, F. et Belatar, M. (2016). UniWatch : A Soft Keyboard for Text Entry on SmartWatches Using 3 Keys. Dans M. Kurosu (dir.). *Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques*, Lecture Notes in Computer Science, 341–349., Cham. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-39516-6_33
- Poupyrev, I., Tomokazu, N. et Weghorst, S. (1998). Virtual Notepad : handwriting in immersive VR. Dans *Proceedings. IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium (Cat. No. 98CB36180)*, 126–132. IEEE.
- Prätorius, M., Valkov, D., Burgbacher, U. et Hinrichs, K. (2014). DigiTap : An

- Eyes-free VR/AR Symbolic Input Device. Dans *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '14, 9–18., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2671015.2671029>
- Rajanna, V. et Hansen, J. P. (2018). Gaze typing in virtual reality : impact of keyboard design, selection method, and motion. Dans *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, p. 15. ACM.
- Rempel, D. (2008). The split keyboard : An ergonomics success story. *Human Factors*, 50(3), 385–392. <http://dx.doi.org/10.1518/001872008X312215>
- Rico, J. et Brewster, S. (2010). Usable gestures for mobile interfaces : evaluating social acceptability. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 887–896. ACM.
- Roudaut, A., Martinez, D., Chohan, A., Otrocol, V.-S., Cobbe-Warburton, R., Steele, M. et Patrichi, I.-M. (2014). Rubikon : A Highly Reconfigurable Device for Advanced Interaction. Dans *Proceedings of the Extended Abstracts of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, 1327–1332., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2559206.2581275>
- Scott, J., Izadi, S., Rezai, L. S., Ruszkowski, D., Bi, X. et Balakrishnan, R. (2010). RearType : text entry using keys on the back of a device. Dans *Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, 171–180. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/1851600.1851630>
- Shao, Y.-F., Chang-Ogimoto, M., Pointner, R., Lin, Y.-C., Wu, C.-T. et Chen, M. (2016). SwipeKey : A Swipe-based Keyboard Design for Smartwatches. Dans *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '16, 60–71., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2935334.2935336>
- Sheridan, J. G., Short, B. W., Laerhoven, K. V., Villar, N. et Kortuem, G. (2003). Exploring cube affordance : towards a classification of non-verbal dynamics of physical interfaces for wearable computing. Dans *IEE Eurowearable*, 113–118., Birmingham, UK. <http://dx.doi.org/10.1049/ic:20030156>
- Shibata, T., Afergan, D., Kong, D., Yuksel, B. F., MacKenzie, I. S. et Jacob, R. J. (2016). DriftBoard : A Panning-Based Text Entry Technique for Ultra-Small Touchscreens. Dans *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, 575–582., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2984511.2984591>

- Shneiderman, B. (2000). The limits of speech recognition. *Communications of the ACM*, 43(9), 63–65.
- Sielhorst, T., Feuerstein, M. et Navab, N. (2008). Advanced medical displays : A literature review of augmented reality. *Journal of Display Technology*, 4(4), 451–467.
- Smith, M. J., Karsh, B.-T., Conway, F. T., Cohen, W. J., James, C. A., Morgan, J. J., Sanders, K. et Zehel, D. J. (1998). Effects of a split keyboard design and wrist rest on performance, posture, and comfort. *Human Factors*, 40(2), 324–336. Publisher : SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA.
- Soukoreff, R. W. et MacKenzie, I. S. (2001). Measuring errors in text entry tasks : an application of the Levenshtein string distance statistic. Dans *CHI'01 extended abstracts on Human factors in computing systems*, 319–320. ACM.
- Soukoreff, R. W. et MacKenzie, I. S. (2003). Metrics for text entry research : an evaluation of MSD and KSPC, and a new unified error metric. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 113–120. ACM.
- Speicher, M., Feit, A. M., Ziegler, P. et Krüger, A. (2018). Selection-based Text Entry in Virtual Reality. Dans *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, 647 :1–647 :13., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3174221>
- Stavness, I., Lam, B. et Fels, S. (2010). pCubee : a perspective-corrected handheld cubic display. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1381–1390. ACM.
- Tan, C. T. et Soh, D. (2010). Augmented reality games : A review. *Proceedings of Gameon-Arabia, Eurosis*.
- Terrenghi, L., Kranz, M., Holleis, P. et Schmidt, A. (2006). A cube to learn : a tangible user interface for the design of a learning appliance. *Personal and Ubiquitous Computing*, 10(2-3), 153–158.
- Thomas, B., Tyerman, S. et Grimmer, K. (1998). Evaluation of text input mechanisms for wearable computers. *Virtual Reality*, 3(3), 187–199. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01408561>
- Van Galen, G. P., Liesker, H. et de Haan, A. (2007). Effects of a vertical keyboard design on typing performance, user comfort and muscle tension. *Applied ergonomics*, 38(1), 99–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2005.09.005>
- Vatavu, R.-D., Anthony, L. et Wobbrock, J. O. (2018). \$ Q : a super-quick,

- articulation-invariant stroke-gesture recognizer for low-resource devices. Dans *Proceedings of the 20th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, p. 23. ACM.
- Vertanen, K., Gaines, D., Fletcher, C., Stanage, A. M., Watling, R. et Kristensson, P. O. (2019). VelociWatch : designing and evaluating a virtual keyboard for the input of challenging text. Dans *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–14.
- Vertanen, K. et Kristensson, P. O. (2011). A versatile dataset for text entry evaluations based on genuine mobile emails. Dans *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, 295–298. ACM.
- Vi, S. (2018). *Mapping the Current Understanding of Text Input within Virtual and Augmented Reality Environments*. Rapport technique, University of Calgary.
- Vonach, E., Ternek, M., Gerstweiler, G. et Kaufmann, H. (2016). Design of a Health Monitoring Toy for Children. Dans *Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children, IDC '16*, 58–67., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2930674.2930694>
- Walker, J., Li, B., Vertanen, K. et Kuhl, S. (2017). Efficient Typing on a Visually Occluded Physical Keyboard. Dans *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*, 5457–5461., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3025453.3025783>
- Wang, C.-Y., Chu, W.-C., Chiu, P.-T., Hsiu, M.-C., Chiang, Y.-H. et Chen, M. Y. (2015a). PalmType : Using Palms As Keyboards for Smart Glasses. Dans *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '15*, 153–160., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2785830.2785886>
- Wang, C.-Y., Hsiu, M.-C., Chiu, P.-T., Chang, C.-H., Chan, L., Chen, B.-Y. et Chen, M. Y. (2015b). PalmGesture : Using Palms as Gesture Interfaces for Eyes-free Input. Dans *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '15*, 217–226., Copenhagen, Denmark. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/2785830.2785885>
- Ward, D. J., Blackwell, A. F. et MacKay, D. J. (2000). Dasher-a data entry interface using continuous gestures and language models. Dans *UIST*, 129–137.

- Whitmire, E., Jain, M., Jain, D., Nelson, G., Karkar, R., Patel, S. et Goel, M. (2017). DigiTouch : Reconfigurable Thumb-to-Finger Input and Text Entry on Head-mounted Displays. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 1(3), 113 :1–113 :21. <http://dx.doi.org/10.1145/3130978>
- Wobbrock, J. O. et Kientz, J. A. (2016). Research contributions in human-computer interaction. *interactions*, 23(3), 38–44. Publisher : ACM New York, NY, USA.
- Wobbrock, J. O., Wilson, A. D. et Li, Y. (2007). Gestures without libraries, tool-kits or training : a \$1 recognizer for user interface prototypes. Dans *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 159–168. ACM. *****.
- Wong, P. C., Zhu, K. et Fu, H. (2018). FingerT9 : Leveraging Thumb-to-finger Interaction for Same-side-hand Text Entry on Smartwatches. Dans *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, 178 :1–178 :10., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3173574.3173752>
- Wu, C.-M., Hsu, C.-W., Lee, T.-K. et Smith, S. (2017). A virtual reality keyboard with realistic haptic feedback in a fully immersive virtual environment. *Virtual Reality*, 21(1), 19–29. <http://dx.doi.org/10.1007/s10055-016-0296-6>. Récupéré de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-016-0296-6>
- Xu, Z., Chen, W., Zhao, D., Luo, J., Wu, T.-Y., Gong, J., Yin, S., Zhai, J. et Yang, X.-D. (2020). BiTipText : Bimanual Eyes-Free Text Entry on a Fingertip Keyboard. Dans *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, 1–13., Honolulu, HI, USA. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/3313831.3376306>
- Xu, Z., Wong, P. C., Gong, J., Wu, T.-Y., Nittala, A. S., Bi, X., Steimle, J., Fu, H., Zhu, K. et Yang, X.-D. (2019). TipText : Eyes-Free Text Entry on a Fingertip Keyboard. Dans *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 883–899. ACM.
- Yamashita, K., Kikuchi, T., Masai, K., Sugimoto, M., Thomas, B. H. et Sugiura, Y. (2017). CheekInput : Turning Your Cheek into an Input Surface by Embedded Optical Sensors on a Head-mounted Display. Dans *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '17, 19 :1–19 :8., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3139131.3139146>
- Yanagihara, N. et Shizuki, B. (2018). Cubic Keyboard for Virtual Reality. Dans

- Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction*, 170–170. ACM.
- Yeo, H.-S., Lee, J., Bianchi, A. et Quigley, A. (2016). WatchMI : Pressure Touch, Twist and Pan Gesture Input on Unmodified Smartwatches. Dans *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '16, 394–399., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2935334.2935375>
- Yi, X., Yu, C., Xu, W., Bi, X. et Shi, Y. (2017). COMPASS : Rotational Keyboard on Non-Touch Smartwatches. Dans *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, 705–715., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3025453.3025454>
- Yu, C., Gu, Y., Yang, Z., Yi, X., Luo, H. et Shi, Y. (2017). Tap, Dwell or Gesture ? : Exploring Head-Based Text Entry Techniques for HMDs. Dans *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, 4479–4488., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3025453.3025964>
- Yu, C., Sun, K., Zhong, M., Li, X., Zhao, P. et Shi, Y. (2016). One-Dimensional Handwriting : Inputting Letters and Words on Smart Glasses. Dans *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, 71–82., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/2858036.2858542>
- Yu, D., Fan, K., Zhang, H., Monteiro, D., Xu, W. et Liang, H.-N. (2018). Pizza-Text : Text Entry for Virtual Reality Systems Using Dual Thumbsticks. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(11), 2927–2935.
- Zeller, L. et Scherffig, L. (2009). CubeBrowser : A Cognitive Adapter to Explore Media Databases. Dans *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, 2619–2622., New York, NY, USA. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/1520340.1520366>
- Zhai, S. et Kristensson, P. O. (2012). The Word-gesture Keyboard : Reimagining Keyboard Interaction. *Commun. ACM*, 55(9), 91–101. <http://dx.doi.org/10.1145/2330667.2330689>
- Zhou, Z., Cheok, A. D., Pan, J. et Li, Y. (2004). Magic Story Cube : an interactive tangible interface for storytelling. Dans *Proceedings of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology*, ACE '04, 364–365., Singapore. Association for Computing Machinery. <http://dx.doi.org/10.1145/1067343.1067404>